

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ESPACIOS SONOROS: MEDICIÓN DE VARIABLES  
ACÚSTICAS Y CREACIÓN DE ESPACIOS VIRTUALES**

**Sergio Rovira Bonilla  
Tutor: José Luis Carles Arribas  
Ponente: Daniel Ramos Castro**

**JUNIO 2019**



# **ESPACIOS SONOROS: MEDICIÓN DE VARIABLES ACÚSTICAS Y CREACIÓN DE ESPACIOS VIRTUALES**

**AUTOR: Sergio Rovira Bonilla**  
**TUTOR: José Luis Carles Arribas**

**Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Junio2019**





## **Resumen (castellano)**

En este Trabajo Fin de Grado se realiza el estudio acústico de dos espacios diferentes de la Universidad Autónoma de Madrid. En concreto, la Plaza Mayor y la Sala polivalente o multiusos, situada en el semisótano de la Plaza Mayor. Para realizar este estudio, se han hecho diversas mediciones que servirán como base científica para entender cómo se comportan estos espacios y poder valorar su sonoridad. Una vez realizadas las medidas de cada espacio, se ha realizado una discusión de los resultados para concretar si son adecuados para la palabra y/o música, aunque no hayan sido diseñadas para tal propósito. Además, este TFG contempla la auralización experimental de los espacios.

Inicialmente, se ha realizado un estudio del estado del arte en el ámbito de la acústica, donde se incluye el estudio de cada uno de los parámetros acústicos que se medirán en los espacios.

El siguiente paso, es establecer el criterio de medida para cada espacio. Esto es, establecer los puntos de medida (fuente y micrófono) y elegir la instrumentación necesaria, tanto hardware como software. Una vez medidos los dos espacios, se han presentado, analizado y discutido los resultados obtenidos con el objeto de entender su comportamiento. Por otro lado, y gracias a los estudios vistos en el estado del arte, se ha podido valorar si los espacios son adecuados o no, para aplicaciones de voz y música. Por último, se han extraído las respuestas al impulso necesarias para realizar la auralización propuesta en este TFG.

Finalmente, se detallan cada una de las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo. Además, se plantean diferentes propuestas para trabajos futuros.

## **Palabras clave (castellano)**

Acústica, frecuencia, respuesta al impulso, tiempo de reverberación, definición, claridad, espectrograma, auralización.

## **Abstract (English)**

In this Bachelor Thesis, the acoustic study of two different rooms of the Universidad Autónoma of Madrid is carried out. Specifically, the Plaza Mayor and the multipurpose room, located in the basement of the Plaza Mayor. To carry out this study, several measurements have been done that will serve as a scientific basis in order to understand how these rooms behave and to be able to assess their sound. Once the measurements of each room have been carried out, a discussion of the results has been done to determine if they are suitable for the word and/or music, although they have not been designed for that purpose. In addition, this TFG contemplates the experimental auralization of rooms.

Initially, a study of the state of the art in the field of acoustics has been done, which includes the study of each acoustic parameter that will be measured in the rooms.

The next step is to establish the measurement criteria for each space. This is to establish the measurement points (source and microphone) and choose the necessary instrumentation, both hardware and software. Once the two rooms have been measured, the results obtained have been presented, analyzed and discussed in order to understand their behaviour. On the other hand, and thanks to the studies of the state of the art, it has been possible to assess whether the spaces are suitable or not for voice and music applications. Finally, the impulse responses necessary to carry out the auralization proposed in this TFG have been extracted.

Finally, the conclusions reached in this work are explained. In addition, different proposals for future work are proposed.

## **Keywords (inglés)**

Acoustic, frequency, impulse response, reverberation time, definition, clarity, spectrogram, auralization.

## ***Agradecimientos***

Agradecer a mi familia y amigos por la confianza y el apoyo que me han dado siempre, para lo bueno y para lo malo. Gracias por motivarme para que no me rindiera en todo aquello que perseguía.

Gracias a mi tutor, José Luis, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo. Por tu ayuda y tu interés para que pudiera desarrollarlo. Gracias a Daniel Ramos y a Joaquín Gonzalez, vuestras asignaturas me inspiraron e hicieron aumentar mi interés por el sonido y la acústica.

Agradecer a Ricardo Atienza por su ayuda durante la realización de las medidas y el desarrollo de este trabajo.

Por ultimo, quiero dar las gracias a todas las personas que han pasado por mi vida y han hecho de mí lo que soy ahora: profesores, compañeros del colegio, del instituto, de la universidad...gracias.





## INDICE DE CONTENIDOS

1 Introducción.....	7
1.1 Motivación.....	7
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Organización de la memoria.....	7
2 Estado del arte .....	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Sensación sonora .....	9
2.3 Voz hablada y voz cantada .....	10
2.4 Acústica musical.....	11
2.5 Acústica arquitectónica .....	11
2.6 Auralización.....	12
3 Diseño.....	14
3.1 Instrumentación requerida .....	14
3.1.1 Fuente sonora.....	14
3.1.2 Microfonía .....	14
3.1.3 Sistema de análisis y auralización .....	15
3.2 Descripción de los espacios.....	15
3.2.1 Plaza Mayor.....	15
3.2.2 Sala polivalente .....	16
3.3 Parámetros acústicos.....	17
3.3.1 Nivel de presión sonora .....	17
3.3.2 Respuesta al impulso .....	17
3.3.3 Tiempo de reverberación .....	17
3.3.4 Tiempo de decaimiento temprano .....	18
3.3.5 Claridad .....	18
3.3.6 Definición .....	19
3.3.7 Valores recomendados.....	19
4 Desarrollo .....	21
4.1 Plaza Mayor.....	21
4.1.1 Medición 1 .....	21
4.1.2 Medición 2.....	22
4.1.3 Medición 2.2.....	22
4.1.4 Medición 2.2.3.....	23
4.1.5 Medición 3.....	23
4.1.6 Medición 4.....	24
4.2 Sala polivalente .....	24
4.3 Auralización de los espacios.....	25
5 Integración, pruebas y resultados .....	26
5.1 Plaza Mayor.....	26
5.1.1 Medición 1 .....	26
5.1.2 Medición 2.....	28
5.1.3 Medición 2.2.....	29
5.1.4 Medición 2.2.3.....	31
5.1.5 Medición 3.....	32
5.1.6 Medición 4.....	34
5.1.7 Discusión de los resultados .....	36
5.1.8 Recreación sonora.....	37

5.2 Sala polivalente .....	40
5.2.1 Mediciones con micrófono binaural .....	40
5.2.2 Mediciones con micrófono omnidireccional .....	43
5.2.3 Discusión de los resultados .....	44
5.2.4 Recreación sonora.....	45
5.3 Medición de la fuente sonora.....	46
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	48
6.1 Conclusiones.....	48
6.2 Trabajo futuro .....	48
Referencias .....	49
Anexos.....	- 1 -
A    Resultados Sala polivalente .....	- 1 -

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 UMBRAL DE AUDICIÓN.....	9
FIGURA 2-2 FORMANTES DE LAS VOCALES DEL ESPAÑOL [8] .....	10
FIGURA 2-3 FILTRO HRTF .....	13
FIGURA 2-4 SISTEMA DE AURALIZACIÓN POR CONVOLUCIÓN .....	13
FIGURA 3-1 FUENTE SONORA .....	14
FIGURA 3-2 MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL Y DE MEDIDA .....	14
FIGURA 3-3 INTERFAZ DE AUDIO.....	15
FIGURA 3-4 POSICIONES DE FUENTE SONORA Y MICRÓFONO EN LA PLAZA MAYOR .....	16
FIGURA 3-5 POSICIONES DE FUENTE SONORA Y MICRÓFONO EN LA SALA POLIVALENTE.....	16
FIGURA 4-1 MEDICIÓN 1 EN LA PLAZA MAYOR.....	22
FIGURA 4-2 MEDICIÓN 2 EN LA PLAZA MAYOR.....	22
FIGURA 4-3 MEDICIÓN 2.2 EN LA PLAZA MAYOR.....	23
FIGURA 4-4 MEDICIÓN 3 EN LA PLAZA MAYOR.....	23
FIGURA 4-5 MEDICIÓN 4 EN LA PLAZA MAYOR.....	24
FIGURA 4-6 MEDICIÓN BINAURAL EN LA SALA POLIVALENTE .....	24
FIGURA 4-7 MEDICIÓN OMNIDIRECCIONAL EN LA SALA POLIVALENTE .....	25

FIGURA 4-8 ESQUEMA DE AURALIZACIÓN EXPERIMENTAL.....	25
FIGURA 5-1 C50, C80 Y D50 DE LA MEDICIÓN 2 .....	29
FIGURA 5-2 C50, C80 Y D50 DE LA MEDICIÓN 3 .....	33
FIGURA 5-3 SISTEMA EMPLEADO EN LA AURALIZACIÓN EXPERIMENTAL.....	38
FIGURA 5-4 RESPUESTA AL IMPULSO BINAURAL DE LA MEDICIÓN 1 Y 4.....	38
FIGURA 5-5 SEÑAL DE ENTRADA.....	39
FIGURA 5-6 ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL DE ENTRADA .....	39
FIGURA 5-7 ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL AURALIZADA (MEDICIÓN 1) .....	39
FIGURA 5-8 ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL AURALIZADA (MEDICIÓN 4) .....	40
FIGURA 5-9 VALORES MEDIOS DE EDT, T20 Y T30 (BINAURAL).....	41
FIGURA 5-10 VALORES MEDIOS DE C50 Y C80 (BINAURAL).....	42
FIGURA 5-11 VALORES MEDIOS DE D50 (BINAURAL) .....	42
FIGURA 5-12 VALORES MEDIOS DE EDT, T20 Y T30 (OMNIDIRECCIONAL).....	43
FIGURA 5-13 VALORES MEDIOS DE C50, C80 Y D50 (OMNIDIRECCIONAL) .....	44
FIGURA 5-14 RESPUESTA AL IMPULSO BINAURAL OBTENIDA EN P4 Y P12.....	45
FIGURA 5-15 ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL AURALIZADA (P4).....	46
FIGURA 5-16 ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL AURALIZADA (P12).....	46
FIGURA 5-17 RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LA FUENTE SONORA .....	47

## INDICE DE TABLAS

TABLA 3-1 SALAS DE TEATRO Y PALABRA.....	20
TABLA 3-2 SALAS MULTIUSOS .....	20
TABLA 3-3 SALAS DE CONCIERTOS .....	20
TABLA 5-1 RESULTADOS MEDICIÓN 1 CON MICRÓFONO IZQUIERDO.....	26
TABLA 5-2 RESULTADOS MEDICIÓN 1 CON MICRÓFONO DERECHO .....	26
FIGURA 5-3 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 1 .....	27

FIGURA 5-4 C50, C80 Y D50 DE LA MEDICIÓN 1 .....	27
TABLA 5-5 RESULTADOS MEDICIÓN 2 CON MICRÓFONO IZQUIERDO.....	28
TABLA 5-6 RESULTADOS MEDICIÓN 2 CON MICRÓFONO DERECHO .....	28
FIGURA 5-7 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 2 .....	28
TABLA 5-8 RESULTADOS MEDICIÓN 2.2 CON MICRÓFONO IZQUIERDO.....	30
TABLA 5-9 RESULTADOS MEDICIÓN 2.2 CON MICRÓFONO DERECHO .....	30
FIGURA 5-10 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 2.2 .....	30
FIGURA 5-11 C50, C80 Y D50 DE LA MEDICIÓN 2.2 .....	31
TABLA 5-12 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 2.2.3 .....	32
TABLA 5-13 RESULTADOS MEDICIÓN 3 CON MICRÓFONO IZQUIERDO.....	32
TABLA 5-14 RESULTADOS MEDICIÓN 3 CON MICRÓFONO DERECHO .....	32
FIGURA 5-15 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 3 .....	33
TABLA 5-16 RESULTADOS MEDICIÓN 4 CON MICRÓFONO IZQUIERDO.....	34
TABLA 5-17 RESULTADOS MEDICIÓN 4 CON MICRÓFONO DERECHO .....	34
FIGURA 5-18 EDT, T20 Y T30 DE LA MEDICIÓN 4 .....	34
FIGURA 5-19 C50, C80 Y D50 DE LA MEDICIÓN 4 .....	35
TABLA 5-20 VALORES REPRESENTATIVOS DE LA PLAZA MAYOR .....	36
TABLA 5-21 VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON MICRÓFONO IZQUIERDO .....	41
TABLA 5-22 VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON MICRÓFONO DERECHO .....	41
TABLA 5-23 VALORES MEDIOS DE LA MEDICIÓN OMNIDIRECCIONAL.....	43
TABLA 5-24 VALORES REPRESENTATIVOS DE LA SALA POLIVALENTE (BINAURAL). ....	44
TABLA 5-25 VALORES REPRESENTATIVOS DE LA SALA POLIVALENTE (OMNIDIRECCIONAL). ....	45
TABLA 0-1 MEDICIÓN EN P1 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO.....	- 1 -
TABLA 0-2 MEDICIÓN EN P1 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 1 -
TABLA 0-3 MEDICIÓN EN P2 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO.....	- 1 -
TABLA 0-4 MEDICIÓN EN P2 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 1 -

TABLA 0-5 MEDICIÓN EN P3 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 2 -
TABLA 0-6 MEDICIÓN EN P3 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 2 -
TABLA 0-7 MEDICIÓN EN P4 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 2 -
TABLA 0-8 MEDICIÓN EN P4 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 2 -
TABLA 0-9 MEDICIÓN EN P5 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 3 -
TABLA 0-10 MEDICIÓN EN P5 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 3 -
TABLA 0-11 MEDICIÓN EN P6 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 3 -
TABLA 0-12 MEDICIÓN EN P6 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 3 -
TABLA 0-13 MEDICIÓN EN P7 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 3 -
TABLA 0-14 MEDICIÓN EN P7 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 4 -
TABLA 0-15 MEDICIÓN EN P8 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 4 -
TABLA 0-16 MEDICIÓN EN P8 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 4 -
TABLA 0-17 MEDICIÓN EN P9 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 4 -
TABLA 0-18 MEDICIÓN EN P9 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 5 -
TABLA 0-19 MEDICIÓN EN P10 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 5 -
TABLA 0-20 MEDICIÓN EN P10 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 5 -
TABLA 0-21 MEDICIÓN EN P11 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 5 -
TABLA 0-22 MEDICIÓN EN P11 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 5 -
TABLA 0-23 MEDICIÓN EN P12 CON EL MICRÓFONO IZQUIERDO .....	- 6 -
TABLA 0-24 MEDICIÓN EN P12 CON EL MICRÓFONO DERECHO .....	- 6 -
TABLA 0-25 MEDICIÓN EN P1 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 6 -
TABLA 0-26 MEDICIÓN EN P4 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 6 -
TABLA 0-27 MEDICIÓN EN P5 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 7 -
TABLA 0-28 MEDICIÓN EN P6 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 7 -
TABLA 0-29 MEDICIÓN EN P7 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 7 -
TABLA 0-30 MEDICIÓN EN P10 CON EL MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL .....	- 7 -



# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

La física acústica se ha convertido en un campo de estudio de gran importancia por diversas razones. En la actualidad, la masificación de las ciudades ha causado un aumento del nivel de ruido. De hecho, ya se habla de contaminación acústica en las zonas urbanas. Algunas de las consecuencias de este problema pueden ser el estrés, alteraciones del sueño o la pérdida de audición. Por lo tanto, resulta de interés conocer la teoría acústica y sus aplicaciones para reducir y controlar este nivel de ruido que va en aumento.

Otra razón, es el empleo de la acústica para crear espacios sonoros con unas características determinadas. Estas características vendrán dadas por unos requerimientos subjetivos de la percepción sonora. Por ejemplo, para la creación de una sala de cine, además del aislamiento del ruido exterior, se necesitará reducir el tiempo de reverberación. En el caso de una sala dedicada al procesamiento de música, será necesario que la respuesta en frecuencia de la sala sea lo más plana posible. Estas características acústicas serán el punto principal para el desarrollo de este TFG.

Por otro lado, resulta de gran interés el estudio de diversos espacios sonoros que, a pesar de no ser diseñados acústicamente para la realización de conferencias o para la escucha de música en directo, son empleados para dichas actividades. Esto resultará muy útil para “reutilizar” salas u otros recintos que se diseñaron con otro propósito.

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este TFG será la medición de la respuesta en frecuencia y de variables acústicas de dos espacios de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) para entender cómo se comportan dichos espacios acústicamente y cómo influyen estas variables en él. Una vez analizado cada espacio, podremos discutir sobre sus posibles aplicaciones sonoras, es decir, si son adecuados para la palabra y música. Las mediciones se realizarán en la Sala polivalente y la plaza de la Plaza Mayor de la UAM.

Otro objetivo será la recreación sonora virtual, también conocida como auralización, de los dos espacios gracias a la respuesta al impulso obtenida (en cada punto de medida) y al empleo de la convolución.

## 1.3 Organización de la memoria

La memoria se organiza en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este primer capítulo se describe la importancia de la acústica, el interés de la realización de dichas medidas en espacios sonoros y se plantean los objetivos de este TFG. Por último, se detalla brevemente la estructura de este TFG.



- **Capítulo 2: Estado del arte.** Este capítulo incluye una breve introducción de la acústica. También, se mencionan diferentes campos y disciplinas donde la acústica tiene un papel importante, resaltando aquellos que sostienen este TFG.
- **Capítulo 3: Diseño.** En este capítulo se describe la instrumentación y software empleado para la realización de las medidas. Además, incluye los planos de los espacios que fueron sometidos a estudio, junto con las posiciones de fuente sonora y micrófono donde se realizaron las medidas, y sus características principales. También se definen los parámetros acústicos de interés y los valores recomendados de dichos parámetros.
- **Capítulo 4: Desarrollo.** En este capítulo se profundiza en el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros acústicos de cada espacio. También se describe el procedimiento seguido para realizar la auralización.
- **Capítulo 5: Pruebas y resultados.** Este capítulo incluye el análisis y discusión de los resultados obtenidos junto con gráficas y tablas de las medidas realizadas.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.** Por último, se incluye una breve conclusión del TFG y se plantean proyectos futuros que podrían aportar información útil e interesante.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Introducción

La acústica es un campo que estudia el sonido y que engloba múltiples disciplinas como la música, la ingeniería, la arquitectura, la física o la psicología. Decimos que hay sonido cuando una perturbación se propaga por un material elástico y causa una alteración de la presión o un desplazamiento de las partículas del material que pueden ser reconocidos por una persona o por un instrumento [1]. El sonido puede ser producido de formas diferentes: campos vibrantes, cambios de un flujo de aire, fuentes de calor dependientes del tiempo o flujo supersónico.

De una forma u otra, la generación del sonido produce una perturbación en las partículas implicadas que oscilan en el medio. La forma en que la perturbación se transmite de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora [2].

Las oscilaciones de las partículas se pueden caracterizar con la frecuencia, es decir, por el número de oscilaciones por segundo (Hz). Generalmente, los sonidos que percibimos (voz, música, ruidos...) están formados por muchas frecuencias.

### 2.2 Sensación sonora

Por lo que sabemos de la psicoacústica y de la fisiología del oído humano, no somos capaces de oír todas las frecuencias ni sonidos a cualquier nivel de presión sonora. El rango auditivo del oído humano se extiende desde 20 Hz hasta 20 kHz. Esto es así por la cóclea. Este órgano, situado en el oído interno, actúa como un analizador frecuencial. La cóclea nos permite detectar la frecuencia fundamental y timbre de un sonido. Además, el hecho de tener dos oídos, nos permite localizar fuentes sonoras en el espacio.

En la siguiente figura, podemos observar diferentes curvas que indican la sensación sonora que experimentan los sujetos al presentarles un tono a una frecuencia y nivel de presión determinada [3]. En 4 kHz hay un máximo de sensación sonora debido a que el oído externo (tubo abierto por un lado) presenta una resonancia a esa frecuencia.

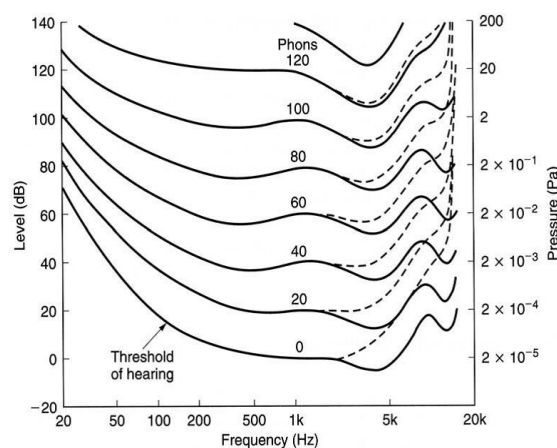


Figura 2-1 Umbral de audición

## 2.3 Voz hablada y voz cantada

El habla es una de las habilidades más importantes del ser humano pues es su principal medio de comunicación. Además, la voz humana es nuestro instrumento musical más antiguo.

La producción de voz, al igual que la producción de sonidos musicales, depende de la acústica. En este caso, depende de la acústica fisiológica de las cavidades del ser humano implicadas en este proceso. Para generar el sonido, el flujo de aire atraviesa la tráquea y la laringe, donde se encuentran las cuerdas vocales. Dependiendo de si las cuerdas vocales están en tensión o no, producimos sonidos sonoros o sordos, respectivamente.

Las cavidades acústicas mencionadas constituyen el tracto vocal que lo forman la cavidad faríngea, oral y nasal. La modificación de la posición de estas cavidades nos permite producir diferentes sonidos a causa de las frecuencias de resonancia generadas. Estas frecuencias se denominan formantes y nos permiten diferenciar los sonidos. Podemos decir, que el tracto vocal actúa como filtro acústico y que los formantes son los máximos espectrales de la envolvente de este filtro. En función de la frecuencia a la que se sitúan estos formantes, podemos diferenciar entre las diferentes vocales.

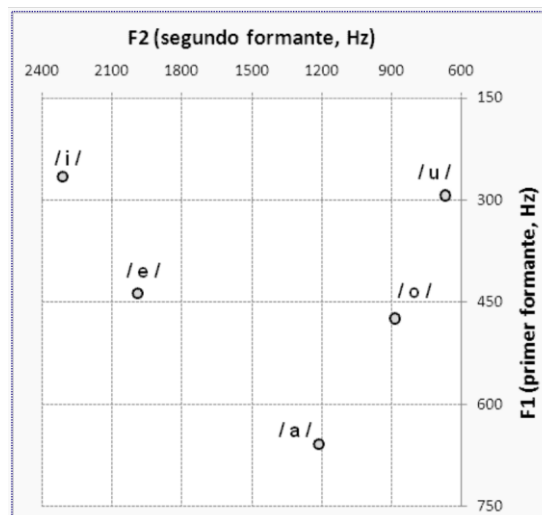


Figura 2-2 Formantes de las vocales del español [8]

La inteligibilidad de la voz, estrechamente ligada con los formantes, se sitúa entre 50 Hz y 4kHz. El nivel de la señal (emisor), el nivel de ruido y las características de la sala (su respuesta al impulso) son los factores que influyen a la inteligibilidad de la palabra.

La voz cantada presenta la misma estructura de formantes para cada sonido, pero con diferente tono musical por la acción muscular que ejercen los cantantes en la laringe. A nivel espectral, la voz cantada posee mayor riqueza armónica que la voz hablada.

La mayoría de las investigaciones enfocadas a esta parte de la acústica, se han centrado en el desarrollo de aplicaciones de reconocimiento de voz y síntesis del habla.

## 2.4 Acústica musical

La acústica musical se ocupa de la producción de sonidos (a través de instrumentos musicales), la transmisión de la música al oyente y la percepción y reconocimiento del sonido por parte del oyente [4]. Estos sonidos se caracterizan unívocamente por el timbre. Gracias a esta cualidad, el ser humano es capaz de reconocer y distinguir instrumentos musicales.

La producción de sonido con el empleo de instrumentos musicales implica entender cómo vibran y cómo radian estos instrumentos. La vibración puede ser transversal, longitudinal o libre. Para poder radiar el sonido tras la vibración, es necesario que el sonido resuene dentro de un volumen (cajas, tubos, barras o membranas). Este volumen ejerce el papel de función de transferencia.

En la actualidad, los instrumentos musicales digitales han cobrado gran importancia en la música. Estos instrumentos digitales están basados en la síntesis del audio. Hay diferentes tipos de síntesis: PCM, aditiva, modal, sustractiva, FM, granular...

- PCM: utiliza muestras pregrabadas para generar sonidos. Estas muestras pregrabadas corresponden a los diferentes elementos de la envolvente del sonido (*Attack, delay, sustain y release*).
- Aditiva: genera el sonido mediante el sumatorio de diferentes ondas sinusoidales y un filtrado deseado.
- Sustractiva: consta de tres fases. En primer lugar, se genera una señal rica en armónicos, triangular o cuadrada (VCO). Después, se filtra esta señal (VCF) y por último, se modula su envolvente (VCA). En las tres fases, el controlador es un oscilador de baja frecuencia (LFO).
- FM: modula señales sinusoidales. Para ello, emplea la frecuencia de la portadora y la frecuencia moduladora. El resultado, es una senoide con mayor contenido espectral
- Granular: divide un sonido de entrada en fragmentos (de 5 a 100 ms) y posteriormente los mezcla de forma aleatoria. Algunos sintetizadores emplean esta síntesis para generar instrumentos de percusión[11].

## 2.5 Acústica arquitectónica

Uno de los propósitos más importantes del estudio de esta rama de la acústica es el diseño de salas, teatros, auditorios, cines... En general, los arquitectos acústicos tratan de entender la física acústica con el fin de optimizar el entorno sonoro de habitaciones y edificios de cualquier ámbito: laboral, residencial, educativo o de ocio [4].

Los primeros espacios que fueron tratados acústicamente fueron los anfiteatros griegos y romanos entre los siglos VI a.C. y I d.C. La mayoría de estos espacios eran al aire libre, lo que sigue siendo un desafío para los acústicos. En espacios cerrados, las ondas sonoras que llegan al oído del oyente se han reflejado en una o varias superficies del espacio. Este conjunto de reflexiones puede provocar que el sonido a escuchar resulte ininteligible para el oyente. Otro factor que puede afectar a la inteligibilidad del sonido son los ruidos externos de la habitación donde se sitúa el oyente.

El exceso de reflexiones en una sala genera eco y modos propios. El eco está asociado al tiempo de reverberación, que analizaremos en el apartado 3.3.3. Los modos propios producen distribuciones no uniformes del nivel de presión sonora, aumentándolo en unos puntos y reduciéndolo en otros. Este problema aparece con la combinación de la onda incidente y de las ondas reflejadas generadas por las reflexiones en la sala [9].

## **2.6 Auralización**

En la década de los noventa, el profesor M. Kleiner, introduce por primera vez el término de “auralización” para referirse a la recreación sonora de un espacio de forma virtual. Esta recreación sonora ofrecerá al sujeto la escucha de un sonido, en cualquier punto de una sala, sin necesidad de estar presente en dicha sala[2].

En la fase del diseño acústico de una sala, conviene realizar previamente un análisis virtual para poder comprobar de forma auditiva las características sonoras del espacio que se quiere construir. Este es sin duda uno de los objetivos principales de la auralización.

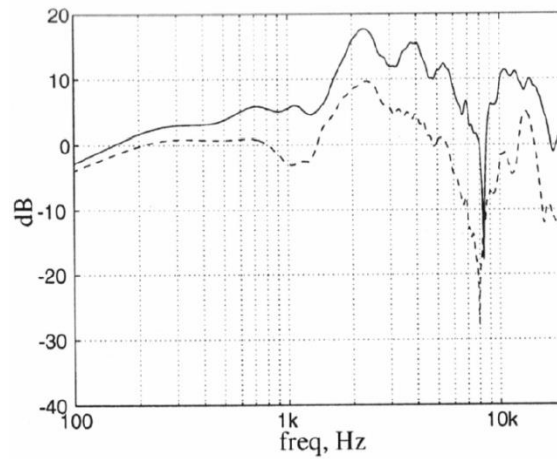
Para salas ya existentes la auralización, además ofrecer al oyente la sensación sonora de dicha sala, le permitirá realizar correcciones acústicas para obtener una mejor respuesta al impulso.

La auralización de una sala está basada en el empleo de la respuesta al impulso  $h(z)$ , de la que hablaremos en el capítulo 3.3.2. En concreto, en este trabajo se han obtenido dos respuestas al impulso de cada punto de medida: la respuesta del oído izquierdo y la respuesta del oído derecho. Esto ha sido posible gracias a la configuración binaural de dos micrófonos omnidireccionales (ver apartado 3.1.2). Por lo tanto, la auralización obtenida será estéreo.

Si seguimos el procedimiento de los sistemas actuales de auralización, para obtener la respuesta al impulso, el software de simulación acústica empleado deberá seguir los siguientes pasos[9]:

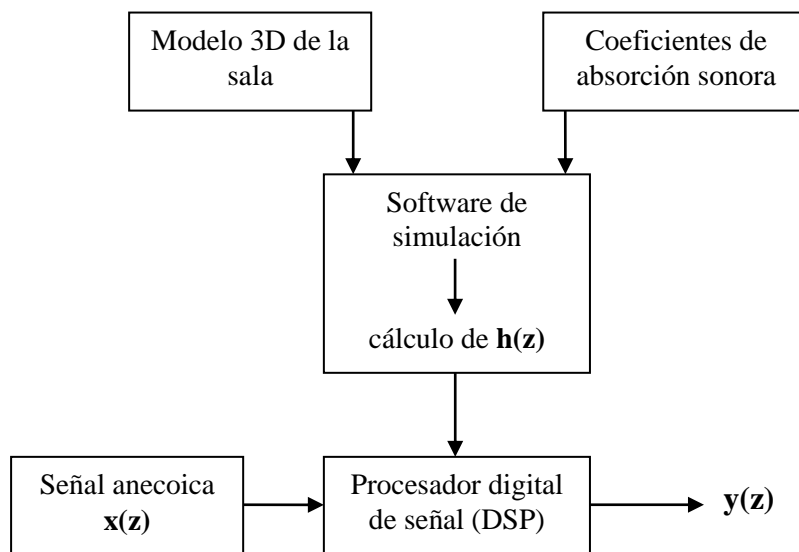
- i. El modelo arquitectónico tridimensional diseñado por ordenador de la sala.
- ii. Asignación de los coeficientes de absorción (por bandas de octava y en función del material constructivo) sonora a cada superficie.
- iii. Información de la fuente sonora y puntos de recepción.
- iv. Estudio de la propagación por medio de rayos entre fuente y receptor.

Otro de los factores a tener en cuenta a la hora de obtener la respuesta al impulso es la función de transferencia de la cabeza o HRTF (*Head-Related Transfer Function*)[9]. La cabeza actúa como filtro ante el sonido, por ello, es necesario calcular este filtro HRTF y convolucionarlo con la respuesta al impulso  $h(z)$ . Además, también se debe tener en cuenta el efecto de filtrado de los auriculares que empleará el oyente. Por lo general, se suelen emplear filtros HRTF y de compensación de los auriculares genéricos.



**Figura 2-3 Filtro HRTF**

Por otro lado, para realizar la auralización se necesita una señal de entrada  $x(z)$  que podrá ser una señal de voz o música “seca”, es decir, grabada previamente en un estudio anecoico. Por último, se realiza la convolución entre la señal de entrada y la respuesta al impulso mediante un procesador digital de señal (DSP). En el capítulo 4.3, se detallará el proceso seguido en la auralización experimental realizada en este trabajo.



**Figura 2-4 Sistema de auralización por convolución**

## 3 Diseño

---

### 3.1 Instrumentación requerida

Ahora vamos a hablar sobre la instrumentación empleada para la realización de las medidas acústicas.

#### 3.1.1 Fuente sonora

Para la realización de las medidas, la norma ISO 3382-2:2008[5], propone la utilización de una fuente omnidireccional. Dada la limitación de recursos, se han empleado dos monitores Genelec 1030A junto con dos soportes. Estos monitores tienen una respuesta en frecuencia de 55 Hz a 18 kHz.



Figura 3-1 Fuente sonora

#### 3.1.2 Microfonía

Como veremos más adelante, se han realizado dos medidas. En una de ellas se han empleado dos micrófonos omnidireccionales DPA d:screet 4060 adaptados como micrófonos binaurales (a partir de ahora los denominaremos así). Por otro lado, se ha realizado una medición con un micrófono de medida NTi Audio miniSPL, también omnidireccional (a partir de ahora lo denominaremos así para diferenciar las medidas realizadas). Como propone la norma ISO 3382-2:2008[5], ambos micrófonos tienen un diámetro menor de 14 mm.



Figura 3-2 Micrófono omnidireccional y de medida

El propósito de haber utilizado esta configuración binaural ha sido para obtener, para cada punto de medida, la respuesta al impulso en estéreo y así, ofrecer una recreación sonora con mayor fidelidad para el oyente.

### 3.1.3 Sistema de análisis y auralización

Tanto los monitores como el micrófono iban conectados con cables XLR a XLR con la interfaz de audio Sound Devices MixPre-6. Esta interfaz de audio iba conectada a un portátil Apple donde teníamos instalado el software gratuito Room EQ Wizard ([www.roomeqwizard.com](http://www.roomeqwizard.com)). Este software se emplea para medir y analizar la respuesta de una sala. Por otro lado, se ha empleado el software Pure-Data como procesador digital de señal. Este software nos permite, de forma gráfica, crear un sistema capaz de recibir una señal de entrada (elegida por el usuario) y convolucionarla con una respuesta al impulso binaural. Además, nos permite grabar la señal auralizada. Obviamente, para realizar la convolución, todas las señales deberán tener la misma tasa de muestreo (fs). Esta frecuencia de muestreo se debe ajustar en el “audio settings” del software.



Figura 3-3 Interfaz de audio

## 3.2 Descripción de los espacios

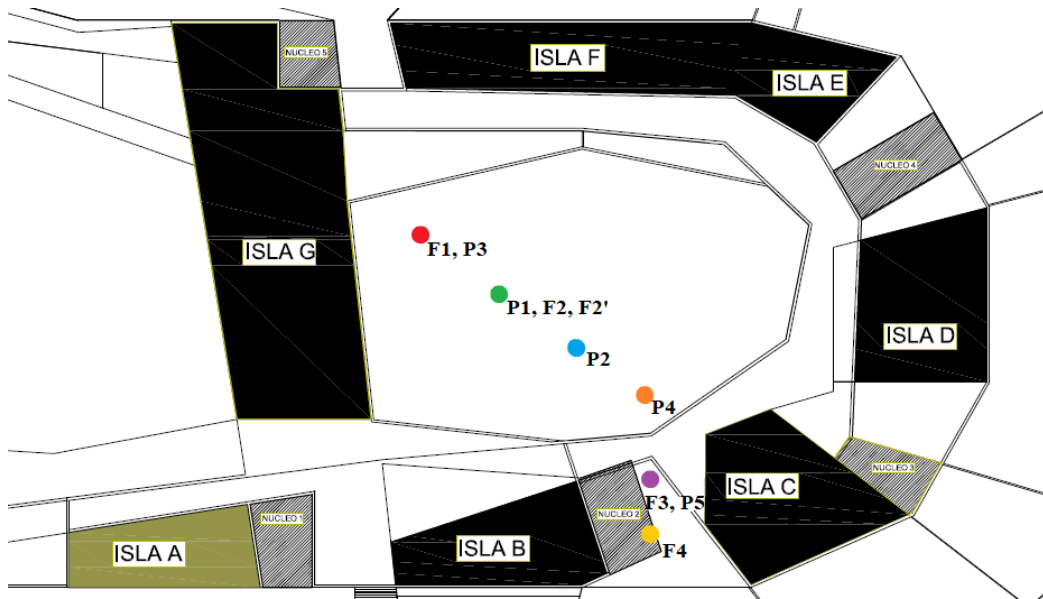
Las mediciones se han realizado en diferentes puntos de dos espacios de la Universidad Autónoma de Madrid: la Plaza Mayor y la Sala polivalente. Como ya anticipamos, en este capítulo detallaremos las características de estos espacios.

### 3.2.1 Plaza Mayor

Este espacio se encuentra ubicado entre la Facultad de Ciencias y Psicología de la Universidad Autónoma de Madrid. Se trata de un espacio al aire libre rodeado de “islas” que ofrecen diversos servicios a los estudiantes de la universidad (una biblioteca, una cafetería...). Esto favorece a que sirva de punto de encuentro y que tenga bastante afluencia de gente. Estas islas forman un bloque con una geometría hexagonal. La Plaza Mayor posee una planta baja, una primera planta y un semisótano.

La elección de estos puntos ha sido así, porque se consideró que era una buena forma de “peinar” todo el espacio sin necesidad de hacer demasiadas medidas.

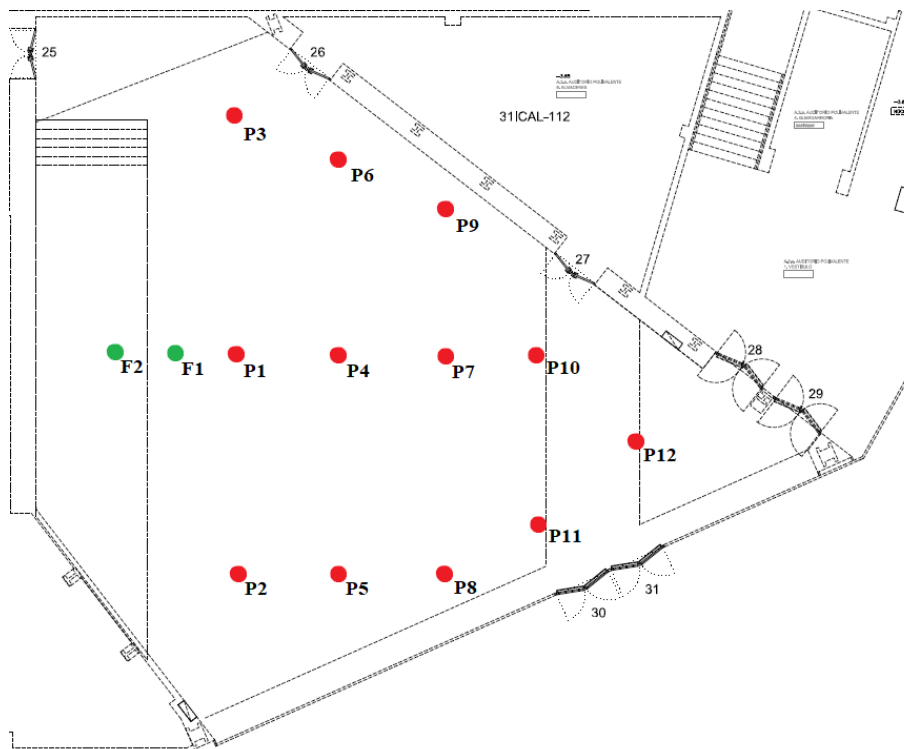




**Figura 3-4 Posiciones de fuente sonora y micrófono en la Plaza Mayor**

### 3.2.2 Sala polivalente

La sala está ubicada en la planta semisótano de la Plaza Mayor de la UAM. En concreto, se encuentra en el semisótano de la Isla B (Núcleo 2). Está condicionada para su uso en conferencias o conciertos musicales. Por lo tanto, es de esperar que estemos ante un espacio diseñado para la realización de dichas actividades.



**Figura 3-5 Posiciones de fuente sonora y micrófono en la Sala polivalente**

### 3.3 Parámetros acústicos

A continuación, se definirán las variables acústicas medidas en el TFG. Además, se incluyen unos valores recomendados de estos parámetros dependiendo la actividad a realizar en el espacio sonoro.

#### 3.3.1 Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora (SPL) es veinte veces el logaritmo en base diez de la relación entre la presión sonora eficaz y la presión sonora de referencia [1]. El valor de  $p_0$  suele ser de 20  $\mu\text{Pa}$  pues se ajusta al umbral de audición del oído humano que vimos anteriormente en el capítulo 2.2. Este parámetro nos permite medir la variación de presión generada por una onda sonora. Lo podemos expresar con la siguiente ecuación:

$$SPL = 20 \cdot \log(p/p_0)$$

El resultado se expresa en decibelios (dB). Esta medida está representada en escala logarítmica, que resulta conveniente dada la no linealidad del sistema auditivo (ver Figura 2-1 Umbral de audición).

#### 3.3.2 Respuesta al impulso

La respuesta al impulso  $h(t)$  es la salida de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) cuando la entrada de dicho sistema es  $\delta(t)$  [10]. En acústica, la respuesta al impulso de una sala (o respuesta de una sala) contiene toda la información de la sonoridad de dicho recinto en el punto donde se realizó la medición. Es decir, en el punto donde se excitó la sala con un impulso  $\delta(t)$ .

Por lo tanto, la respuesta de la sala depende de los materiales de cada superficie y de su forma geométrica. También dependerá del punto donde posicionemos la fuente sonora y donde se coloque el receptor [2].

#### 3.3.3 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es el parámetro acústico más conocido. Cuando nos encontramos en un espacio con mucha reverberación, perdemos inteligibilidad en el habla. En cambio, un espacio con cierto grado de reverberación puede resultar atractivo para la música [4].

El físico W. C. Sabine, uno de los padres de la acústica moderna, definió la reverberación (RT60) como el tiempo que tarda en disminuir 60 dB el nivel de presión sonora en una sala cuando cesa la emisión sonora. Este tiempo varía en función de la frecuencia.

A veces, por la falta de potencia de la fuente o por las características de la sala, resulta más interesante obtener los valores de RT20 o RT30, es decir, cuando el nivel de presión disminuye 20 dB o 30 dB.

Para caracterizar el tiempo de reverberación con un único valor, se promedian los valores obtenidos para las bandas de octava centradas en 500 y 1000 Hz.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1kHz)}{2}$$

### 3.3.4 Tiempo de decaimiento temprano

Una alternativa interesante al tiempo de reverberación es el tiempo de decaimiento temprano (EDT). Se define como seis veces el tiempo que tarda en disminuir 10 dB el nivel de presión sonora cuando cesa la emisión sonora[2].

Dado al fenómeno de enmascaramiento anteriormente mencionado, no siempre suele ser útil medir el tiempo de 0 a -60 dB, por eso, el EDT suele ser un parámetro de reverberación más descriptivo y con mayor relación a la percepción subjetiva. Si una sala presenta un valor de EDT menor que el RT, implica que la sala tiene poca viveza, a nivel subjetivo, en comparación con el valor obtenido de RT.

De nuevo, para caracterizar el tiempo de decaimiento temprano en un único valor, podemos promediar los valores obtenidos en las bandas de octavas centradas en 500 Hz y 1 kHz.

$$EDT_{mid} = \frac{EDT(500Hz) + EDT(1kHz)}{2}$$

### 3.3.5 Claridad

Es un parámetro complementario a la reverberación y se obtiene a partir de la respuesta al impulso. Está relacionada con la separación entre los diferentes sonidos individuales que integran la propia señal de audio. La claridad se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms (C50) o 80 ms (C80) y la que llega pasado este tiempo [6].

$$C_t = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \right) (dB)$$

Donde  $p(t)$  corresponde al nivel de presión sonora, en un tiempo y punto del espacio determinado, de la respuesta al impulso. Dependiendo del valor de  $t$ , estaremos hablando de la claridad de la palabra (C50) o de la claridad musical (C80). Para representar los

valores de claridad con un único valor, podemos calcular los promedios de la siguiente forma [2]:

$$C50_{Avr} = 0,15 \cdot C_{50}(500Hz) + 0,25 \cdot C_{50}(1kHz) + \\ + 0,35 \cdot C_{50}(2kHz) + 0,25 \cdot C_{50}(4kHz)$$

$$C80_3 = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1kHz) + C_{80}(2kHz)}{3}$$

### 3.3.6 Definición

Es un parámetro que también se obtiene a partir de la respuesta impulsiva. Permite relacionar la energía del sonido de las primeras reflexiones (los primeros 50 ms) con respecto a la energía total. Su valor está relacionado con la claridad de palabra, visto anteriormente.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.050} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Para definir un único valor representativo, se calculará la media de los valores obtenidos en hasta la banda de octava centrada en 4 kHz [2].

$$D50_{Avr} = \frac{D_{50}(125Hz)}{6} + \frac{D_{50}(250Hz)}{6} + \frac{D_{50}(500Hz)}{6} \\ + \frac{D_{50}(1kHz)}{6} + \frac{D_{50}(2kHz)}{6} + \frac{D_{50}(4kHz)}{6}$$

### 3.3.7 Valores recomendados

Beranek, en su libro *Concert Halls and Opera Houses*, establece una serie de valores recomendados para diferentes salas y propósitos. Para realizar este estudio, Beranek realizó una serie de mediciones acústicas en diferentes salas de todo el mundo. Los resultados obtenidos en las mediciones los comparó con preferencias acústicas subjetivas de músicos y otras personas vinculadas al mundo de la acústica.

Llegó a la conclusión de que las salas con mejor acústica (para músicos y críticos musicales) compartían una serie de valores similares con los parámetros acústicos que él

había medido [7]. En las siguientes tablas, se recogen algunos de estos valores recomendados para diferentes recintos:

Parámetro acústico	Valor recomendado
<b>RT<sub>mid</sub></b>	0,7 a 1,2 segundos
<b>C50<sub>Avr</sub></b>	> 2 dB
<b>D50<sub>Avr</sub></b>	> 50%

**Tabla 3-1 Salas de teatro y palabra**

Parámetro acústico	Valor recomendado
<b>RT<sub>mid</sub></b>	1,4 a 1,7 segundos
<b>EDT<sub>mid</sub></b>	1,5 a 1,9 segundos
<b>C50<sub>Avr</sub></b>	0 a 2 dB
<b>C80<sub>3</sub></b>	0 a 3 dB
<b>D50<sub>Avr</sub></b>	40 a 50%

**Tabla 3-2 Salas multiusos**

Parámetro acústico	Valor recomendado
<b>RT<sub>mid</sub></b>	1,8 a 2,1 segundos
<b>EDT<sub>mid</sub></b>	2,2 a 2,6 segundos
<b>C80<sub>3</sub></b>	-3 a 0 dB

**Tabla 3-3 Salas de conciertos**

## 4 Desarrollo

---

Como se ha mencionado anteriormente, las mediciones se han realizado en diferentes puntos de los dos espacios que se han descrito. Ahora se va a detallar el procedimiento seguido en cada espacio para la realización de estas medidas. También, se detalla el procedimiento seguido para la auralización experimental realizada en ambos espacios.

### 4.1 Plaza Mayor

El procedimiento realizado en cada medida de este espacio ha sido el siguiente: los dos monitores se situaban juntos en una posición concreta y con diferente ángulo, y el micrófono binaural, lo llevaba colocado José Luis en ambos oídos en otra posición previamente definida.

En primer lugar, se conectaban los monitores y los micrófonos binaurales a la interfaz del audio y esta última al ordenador. Tras calibrar la interfaz de audio y el medidor SPL, el software emitía un barrido de frecuencias (sweep) de 10 segundos. Con el objetivo de adaptar los dos micrófonos de forma binaural, este proceso se realizaba dos veces; primero medíamos con el micrófono del oído izquierdo y luego con el micrófono del oído derecho, y siempre emitiendo con ambas fuentes.

Después de la emisión del barrido, el software nos proporcionaba diferentes resultados de la medición como la respuesta en frecuencia, el espectrograma, los tiempos de reverberación (T30 y T20), el tiempo de decaimiento temprano, el tiempo central, la claridad de palabra y música y la definición, entre otros. Además, nos permite obtener la respuesta al impulso, en formato de audio *wav*, que nos será útil para la recreación de los espacios sonoros.

Esta medición se ha realizado el 26 de febrero entre las 11:00 y las 13:00. Cada una de ellas se ha realizado con muy poca afluencia de personas en la plaza, buscando siempre una aproximación de “recinto vacío”.

#### 4.1.1 Medición 1

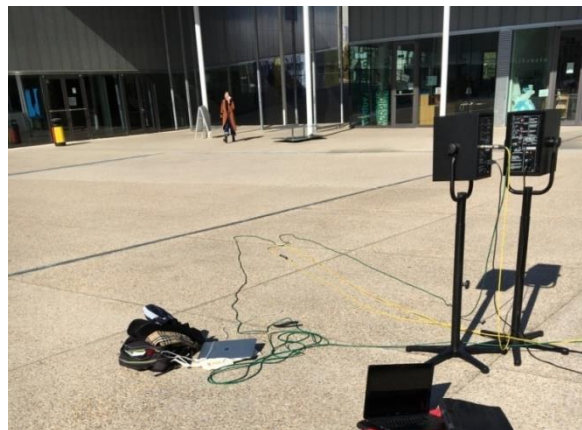
Esta medida se ha realizado con las fuentes situadas en F1 y el micrófono binaural situado en P1. El punto F1 se encuentra al lado de una de las entradas de la Plaza Mayor (al lado de la cafetería) entre la Isla G y la Isla F. Ambos monitores apuntaban a la estructura que rodea la plaza. Uno de ellos a la Isla G y otro a la Isla F.



**Figura 4-1 Medición 1 en la Plaza Mayor**

#### **4.1.2 Medición 2**

Esta medida se ha realizado con las fuentes situadas en F2 y el micrófono binaural situado en P2. El punto F2 está situado a 12 metros (en diagonal) respecto al punto F1. De igual manera, el punto P2 está situado a 12 metros del punto P1. Los dos monitores apuntan de nuevo a las Islas G y F.



**Figura 4-2 Medición 2 en la Plaza Mayor**

#### **4.1.3 Medición 2.2**

Esta medida se ha realizado con las fuentes situadas en el mismo punto que la medida anterior (F2') y el micrófono binaural situado en P3, mismo punto donde colocamos las fuentes en la medida 1. Además, hemos girado 180° la posición de cada altavoz cambiado así la directividad de la fuente. Ahora, los monitores apuntan a las Islas B y D.



**Figura 4-3 Medición 2.2 en la Plaza Mayor**

#### **4.1.4 Medición 2.2.3**

Esta medida se ha realizado en el mismo punto que la medida 2.2, tanto para el micrófono como para las fuentes. Para esta medida hemos aumentado ligeramente la ganancia de las fuentes y desactivado el límite de RT60 que tenemos en el software. En esta medida en concreto, solo hemos estudiado el comportamiento de los tiempos de reverberación con esos nuevos parámetros. El objetivo de esta medición es estudiar ciertos comportamientos anómalos que nos aparecen en los tiempos de reverberación para algunas frecuencias.

#### **4.1.5 Medición 3**

En esta medida hemos situado las fuentes en F3 y el micrófono binaural en P4. Este punto de medida está situado bajo el techo de la primera planta de la Plaza Mayor, al lado de una de las entradas de ésta.

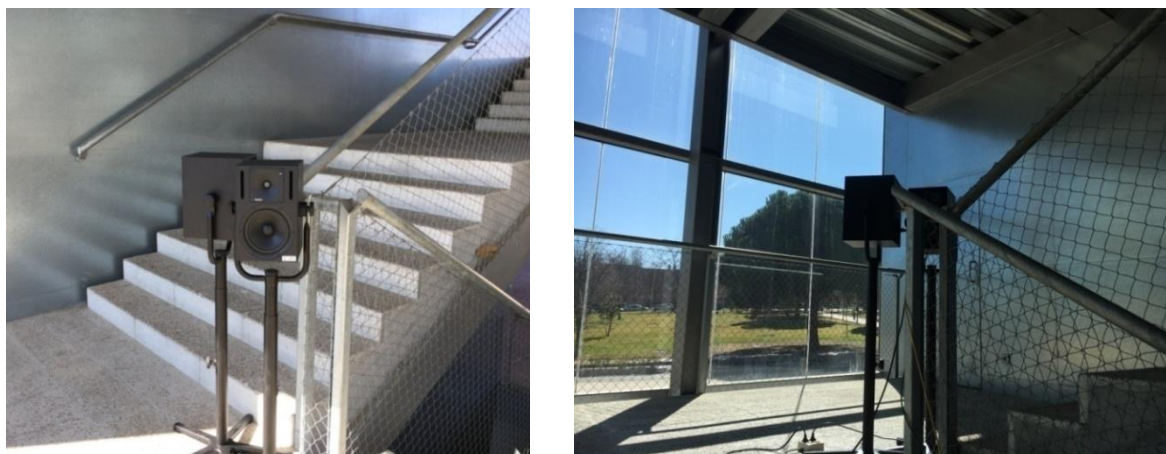


**Figura 4-4 Medición 3 en la Plaza Mayor**



#### 4.1.6 Medición 4

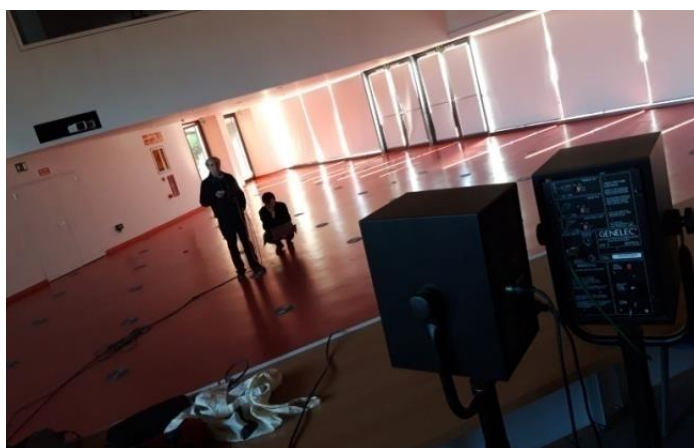
En esta medida hemos situado las fuentes en F4 y el micrófono binaural en P5. Como vemos en la Figura 4-5 Medición 4 en la Plaza Mayor, en esta medición las fuentes están situadas en la entreplanta de la Plaza Mayor.



**Figura 4-5 Medición 4 en la Plaza Mayor**

### 4.2 Sala polivalente

En la Sala polivalente se han realizado dos tipos de medidas. La primera de ellas sigue el mismo procedimiento de las medidas realizadas en la Plaza Mayor. La única diferencia es que ahora tenemos las fuentes situadas en un punto fijo F1. El micrófono binaural toma una posición diferente en cada medida. En concreto, doce puntos repartidos por toda la sala. El punto F1 está situado detrás de una mesa de conferencias. Esta mesa se encuentra a una altura de unos 25 cm por encima del nivel del suelo.



**Figura 4-6 Medición binaural en la Sala polivalente**

El otro tipo de medidas se ha realizado con las fuentes situadas en F2, aproximadamente a dos metros F1, y sobre el escenario de la Sala polivalente. Este escenario está aproximadamente a un metro de altura sobre el nivel del suelo. Para esta medición, se ha empleado el micrófono omnidireccional de medida, situado en seis puntos diferentes de la sala. Estos seis puntos corresponden a los puntos P1, P4, P5, P6, P7 y P10 evaluados anteriormente con el micrófono binaural.

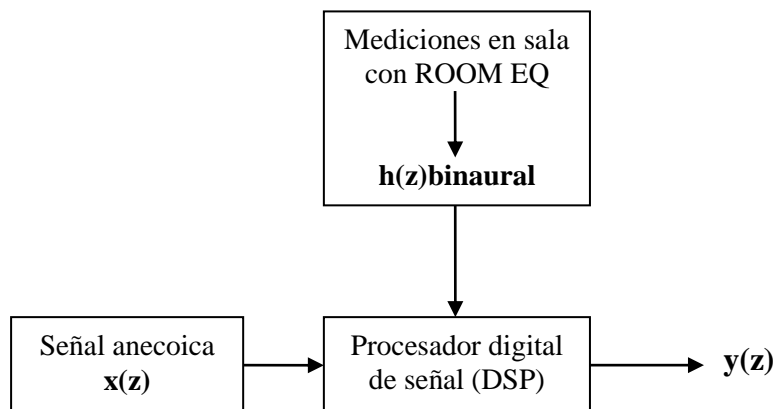


**Figura 4-7 Medición omnidireccional en la Sala polivalente**

Esta medición se ha realizado el 27 de febrero entre las 11:30 y la 13:10. Antes de realizar esta medición, se retiraron todas las sillas que estaban repartidas por toda la sala.

### **4.3 Auralización de los espacios**

Para realizar la auralización de un espacio es necesario obtener la respuesta al impulso del recinto bajo estudio. En este TFG, las respuestas al impulso se han obtenido empleando el ROOM EQ, es decir, no se han seguido los pasos vistos en el capítulo 2.6 para obtener  $h(z)$ . El software empleado nos da la opción de exportar la respuesta al impulso de cada medición en formato de audio *wav*. El siguiente esquema muestra el procedimiento seguido para obtener la señal auralizada  $y(z)$ .



**Figura 4-8 Esquema de auralización experimental**

## 5 Integración, pruebas y resultados

Como ya avanzamos, en este capítulo analizaremos cada espacio y mostraremos los resultados recogidos por el micrófono izquierdo y el micrófono derecho en forma de tablas y gráficas. Dado que los valores recomendados expuestos en el capítulo 3.3.7 vienen dados por bandas de octavas, los resultados de las medidas de este TFG también se mostrarán por bandas de octava. Por último, se realizará una discusión de los resultados obtenidos para cada espacio. Además, se han incluido los resultados de una medición adicional realizada a los monitores empleados.

### 5.1 Plaza Mayor

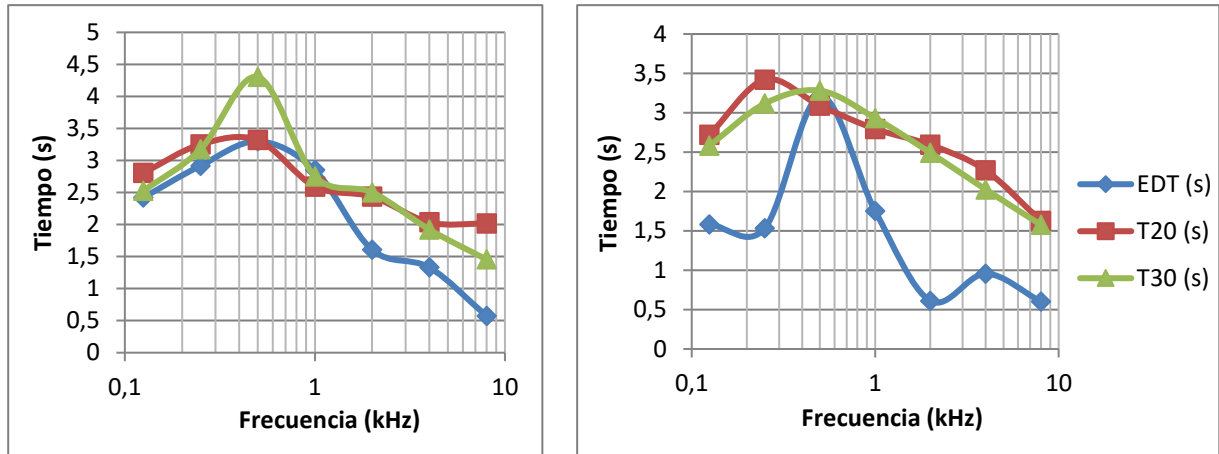
#### 5.1.1 Medición 1

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,421	2,806	2,524	6,47	7,19	81,6
250	2,918	3,250	3,174	5,55	7,38	78,2
500	3,299	3,318	4,304	-4,98	0,77	24,1
1000	2,849	2,593	2,753	-1,04	2,23	44,1
2000	1,607	2,435	2,503	-10,36	4,63	8,4
4000	1,33	2,034	1,923	-10,31	6,20	8,5
8000	0,574	2,016	1,455	-11,33	8,11	6,9

Tabla 5-1 Resultados Medición 1 con micrófono izquierdo

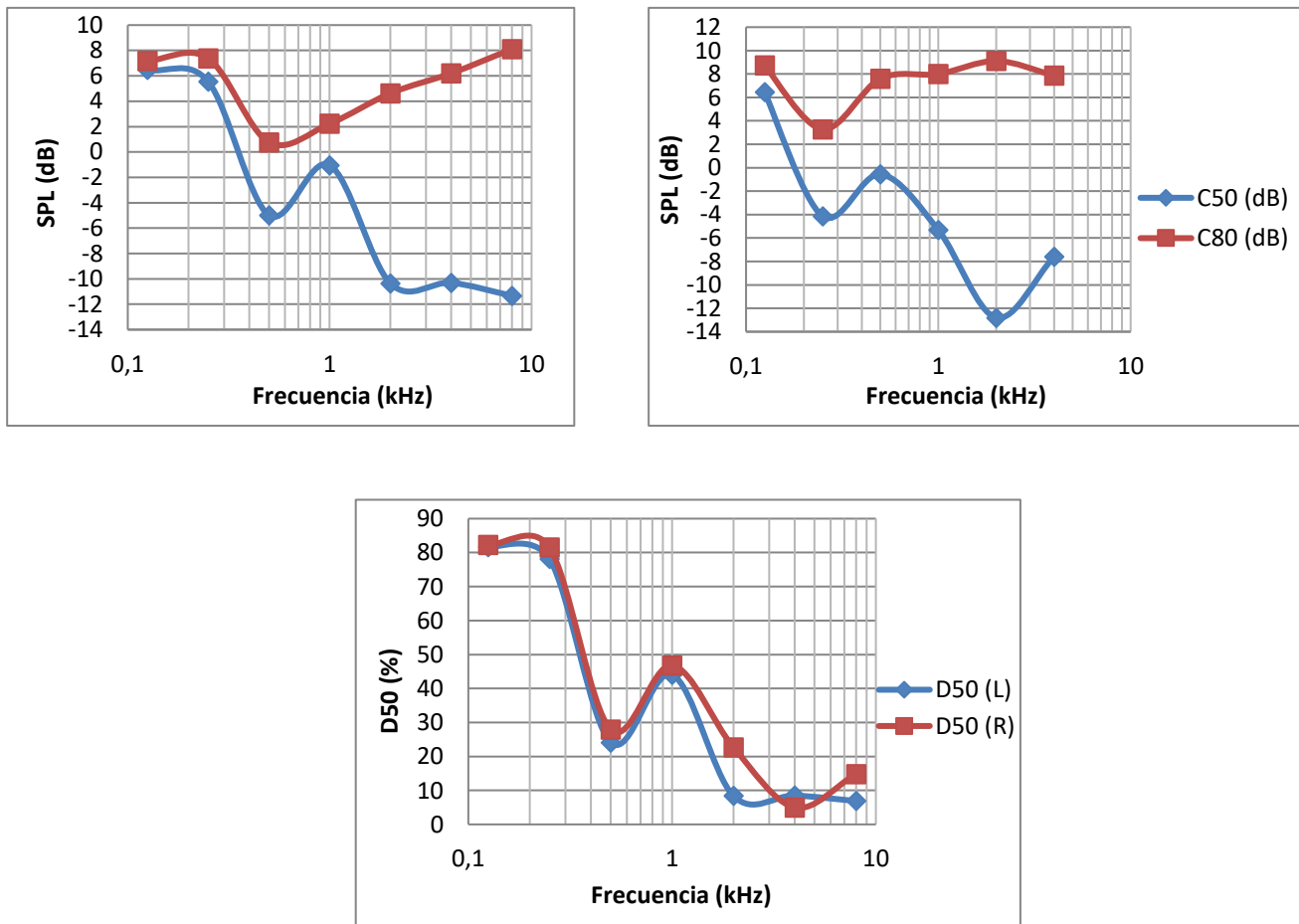
Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,580	2,721	2,583	6,66	8,10	82,3
250	1,533	3,419	3,116	6,45	8,74	81,5
500	3,208	3,090	3,281	-4,13	3,28	27,9
1000	1,751	2,794	2,932	-0,56	7,60	46,8
2000	0,611	2,592	2,491	-5,32	8,00	22,7
4000	0,956	2,268	2,026	-12,80	9,11	5,0
8000	0,603	1,627	1,577	-7,59	7,87	14,8

Tabla 5-2 Resultados Medición 1 con micrófono derecho



**Figura5-3 EDT, T20 y T30 de la Medición 1**

Los tiempos de reverberación se comportan de forma similar en las medidas de ambos micrófonos, sobre todo el T20 y T30. Estas variables toman valores cercanos a 3 segundos. Conforme aumentamos la frecuencia, los tiempos decrecen llegando a valores por debajo de 2 segundos. Esta disminución del tiempo de reverberación, con el aumento de la frecuencia, se debe al efecto de absorción los materiales del espacio.



**Figura5-4 C50, C80 y D50 de la Medición 1**

Podemos ver que, en frecuencias bajas, los valores de claridad son positivos. Si analizamos la fórmula vista en el apartado 3.3.5, podemos concluir que la energía entre 0 y 50 ms (y 80 ms), para esas frecuencias, es mayor que la energía a partir de 50 ms (y 80 ms). A partir de 300 Hz, la claridad de voz desciende rápidamente, tomando valores negativos. Es decir, según nos movemos a frecuencias más altas, la energía a partir de 50 ms es mayor que la energía entre 0 y 50 ms. Esto puede deberse a alguna resonancia del espacio en altas frecuencias. La claridad musical también decrece, pero se mantiene con valores positivos en todo el espectro. Respecto a la definición, como es de esperar por lo visto en 3.3.5 y 3.3.6, podemos ver que tiene un comportamiento muy similar al del C50: en bajas frecuencias presenta sus máximos y decrece con el aumento de la frecuencia.

### 5.1.2 Medición 2

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,703	2,516	2,682	3,96	3,97	71,4
250	0,059	0,04	0,042	30,05	10,74	99,9
500	0,044	0,044	0,035	15,66	-0,16	97,4
1000	2,814	2,652	2,952	-11,31	-11,09	6,9
2000	2,108	2,363	2,443	-4,58	-4,56	25,8
4000	1,206	1,993	2,193	-8,06	-8,04	13,5
8000	1,702	1,412	3,133	-4,42	-4,39	26,6

Tabla 5-5 Resultados Medición 2 con micrófono izquierdo

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	0,116	0,06	0,056	32,32	8,19	99,9
250	0,061	0,047	0,041	31,1	11,56	99,9
500	0,038	0,044	0,043	19,35	-1,63	98,9
1000	2,786	2,789	3,15	-10,78	-10,77	7,7
2000	2,615	2,466	2,533	-2,38	-2,37	36,6
4000	1,847	2,25	11,57	-5,52	-5,47	21,9
8000	1,757	5,149	11,289	-4,58	-4,44	25,8

Tabla 5-6 Resultados Medición 2 con micrófono derecho

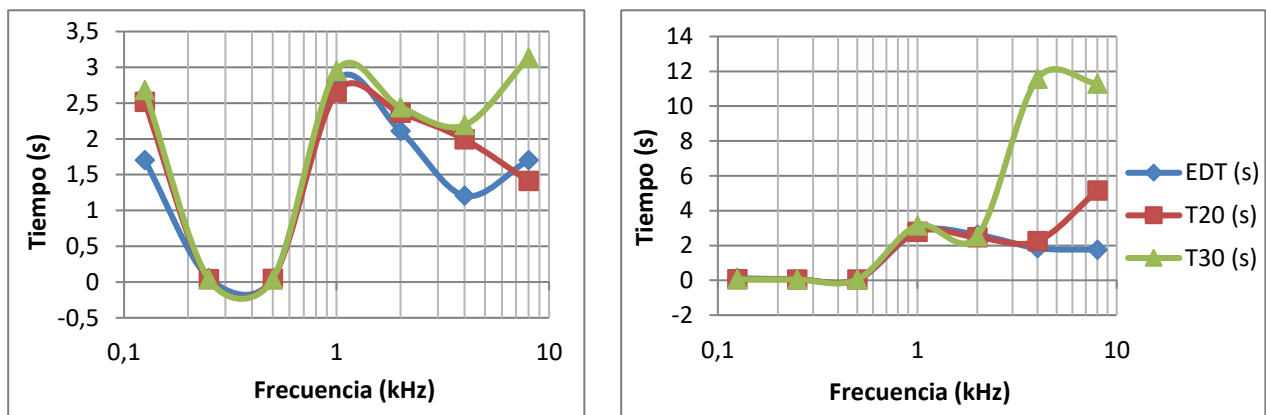


Figura 5-7 EDT, T20 y T30 de la Medición 2

En esta medición podemos ver un descenso considerable de los tiempos de reverberación en bajas frecuencias. Además, en la medición recogida con el micrófono derecho, observamos un aumento muy brusco en los tiempos T20 y T30. Este comportamiento tan anómalo, puede deberse a la falta de potencia de las fuentes. Si nos abstraemos de este comportamiento, podemos ver que los tiempos están, de nuevo, en torno a 3 segundos en torno a 1 kHz.

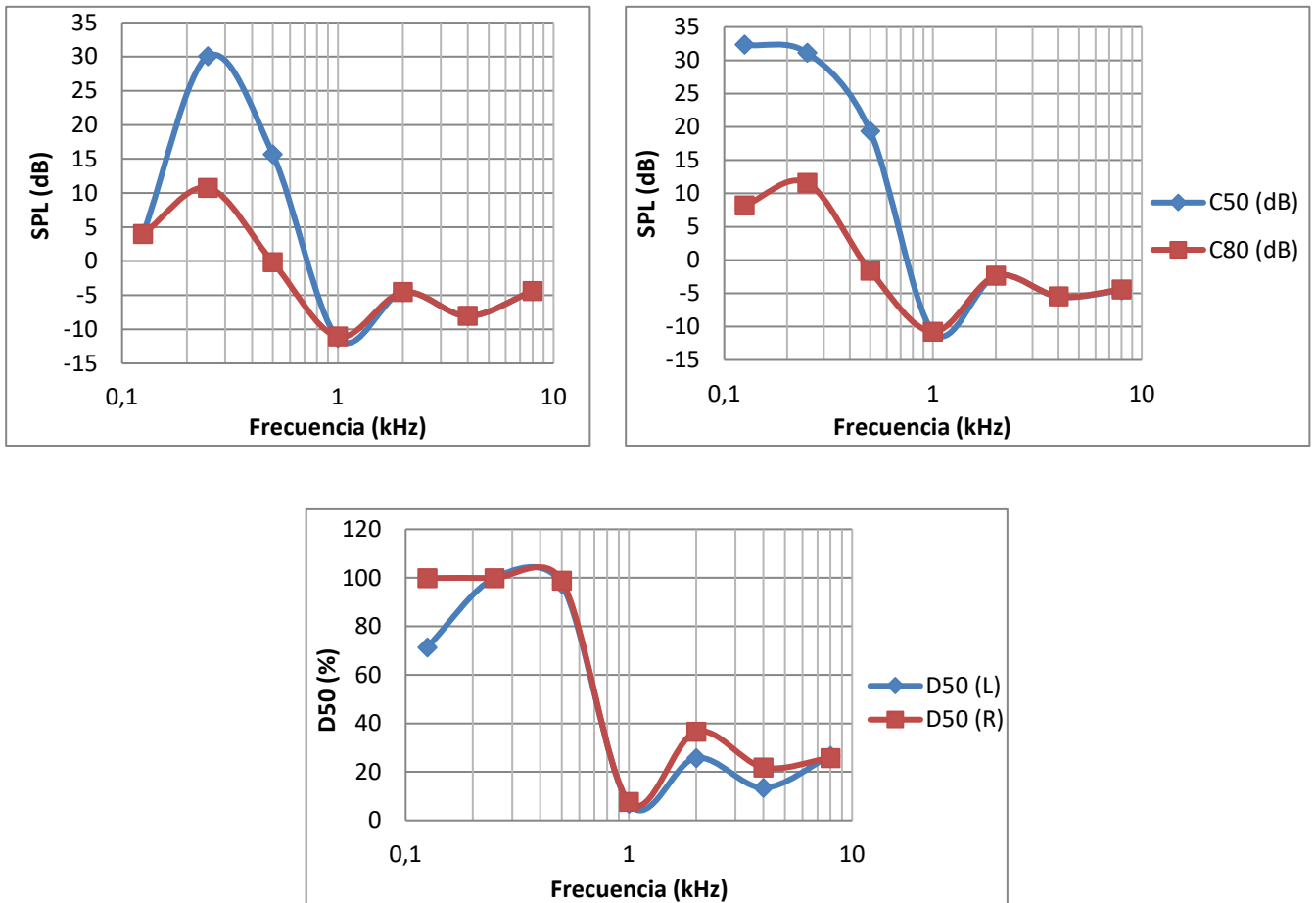


Figura 5-1 C50, C80 y D50 de la Medición 2

Observamos que, de nuevo, los valores de estas tres variables caen rápidamente a partir de los 300 Hz. Podemos observar que ahora tenemos unos valores de C80 muy por debajo de los obtenidos en la medición anterior para frecuencias altas. De hecho, se mantienen negativos a partir de 500 Hz. Esto nos indica que, en esta medición, la energía a partir de 80 ms es mayor que la energía entre 0 y 80 ms. Como vimos en la anterior medición, esto puede deberse a que el espacio resuena en altas frecuencias, provocando que el nivel de presión sonora aumente pasados los primeros milisegundos después de la emisión.

### 5.1.3 Medición 2.2

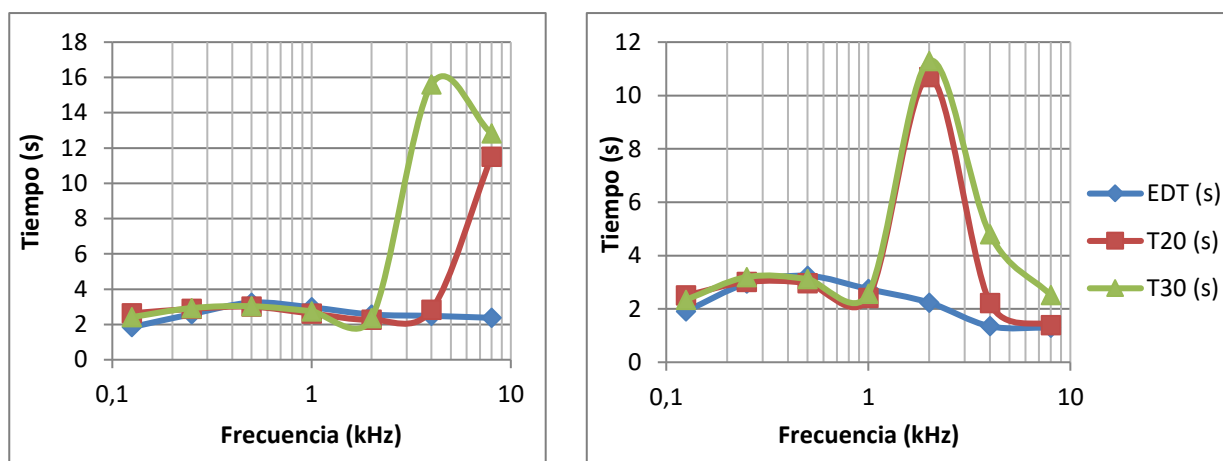
Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,848	2,634	2,414	4,33	5,34	73
250	2,583	2,883	2,929	4,5	6,69	73,8

<b>500</b>	3,237	3,005	3,032	-7,58	-5,96	14,9
<b>1000</b>	2,968	2,618	2,748	-9,07	-6,08	11
<b>2000</b>	2,562	2,27	2,354	-2,35	-2,16	36,8
<b>4000</b>	2,486	2,835	15,6	-3,61	-3,22	30,4
<b>8000</b>	2,375	11,51	12,821	-4,71	-3,37	25,2

**Tabla 5-8 Resultados Medición 2.2 con micrófono izquierdo**

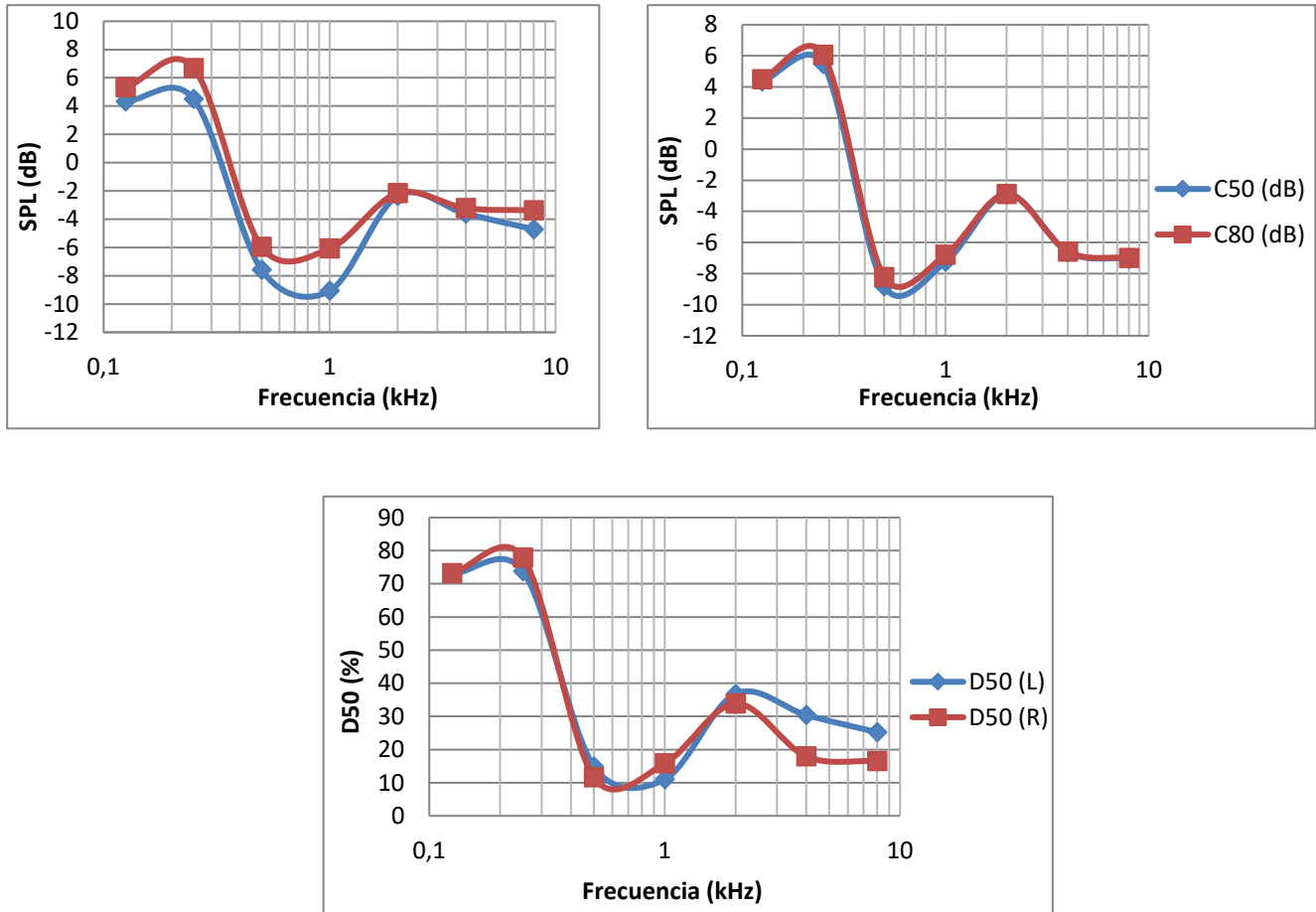
<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,909	2,501	2,339	4,35	4,49	73,2
<b>250</b>	2,949	3,01	3,193	5,47	6,06	77,9
<b>500</b>	3,24	2,965	3,116	-8,81	-8,23	11,6
<b>1000</b>	2,741	2,408	2,572	-7,25	-6,79	15,8
<b>2000</b>	2,235	10,693	11,295	-2,89	-2,88	33,9
<b>4000</b>	1,349	2,217	4,801	-6,61	-6,58	17,9
<b>8000</b>	1,3	1,393	2,515	-7,05	-7	16,5

**Tabla 5-9 Resultados Medición 2.2 con micrófono derecho**



**Figura5-10 EDT, T20 y T30 de la Medición 2.2**

En esta medición, si no contamos con el comportamiento anómalo en frecuencias a partir de 1 kHzo 2 kHz (dependiendo de la gráfica), podemos observar unos valores más constantes en torno a 3 segundos. El EDT, que no presenta ningún comportamiento anómalo, disminuye ligeramente según nos movemos en frecuencias por encima de 1 kHz.



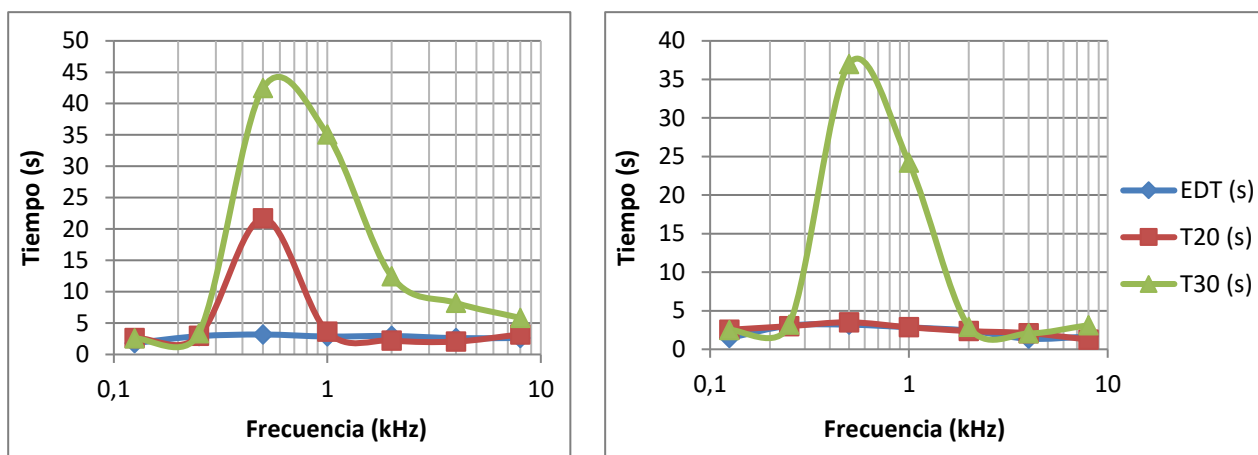
**Figura5-11 C50, C80 y D50 de la Medición 2.2**

Podemos ver que estos parámetros vuelven a tener un comportamiento muy similar al de la anterior medición. Además, las tres variables tienden a tomar valores similares en todo el rango de frecuencias. En torno a 500 Hz, las tres variables descienden a valores muy por debajo de sus valores máximos. A partir de esa frecuencia, la claridad de voz y musical toman valores negativos, por lo tanto, podemos decir que la energía a partir de 80 ms es mayor a la energía entre 0 y 80 ms para ese rango de frecuencias.

#### 5.1.4 Medición 2.2.3

Como vimos anteriormente, esta medición se harealizado con el objeto de encontrar una explicación a estos resultados anómalos obtenidos en los tiempos de reverberación. Principalmente en los tiempos T20 y T30 y en frecuencias medias-altas.





**Tabla 5-12 EDT, T20 y T30 de la Medición 2.2.3**

Podemos ver que, tras los nuevos ajustes realizados, seguimos obteniendo estos resultados anómalos en T20 (en la medición del oído izquierdo) y T30. Por lo tanto, es muy probable que esto se deba a la falta de potencia de las fuentes para cubrir este espacio. Como cabe de esperar, este comportamiento es más habitual en los valores de T30 porque, según vimos en el apartado 3.3.3, hay que medir el tiempo hasta que la señal cae 30 dB. Esto implica que llega un momento, después de la emisión, en el que las fuentes no tienen la suficiente potencia para que el software pueda medir el tiempo de reverberación tras esa caída de decibelios.

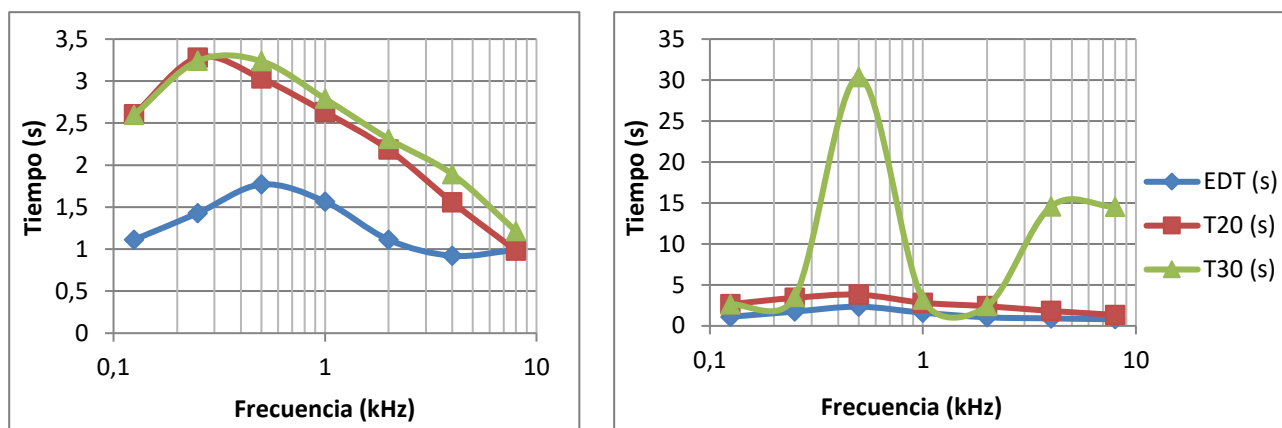
### 5.1.5 Medición 3

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,112	2,603	2,597	7,02	7,67	83,4
250	1,428	3,28	3,239	5,23	5,96	76,9
500	1,769	3,031	3,237	0,11	3,15	50,6
1000	1,566	2,632	2,79	2,16	3,97	62,2
2000	1,111	2,185	2,311	1,08	3,14	56,2
4000	0,921	1,558	1,892	-0,06	2,94	49,7
8000	0,991	0,982	1,215	-2,57	0,29	35,6

**Tabla 5-13 Resultados Medición 3 con micrófono izquierdo**

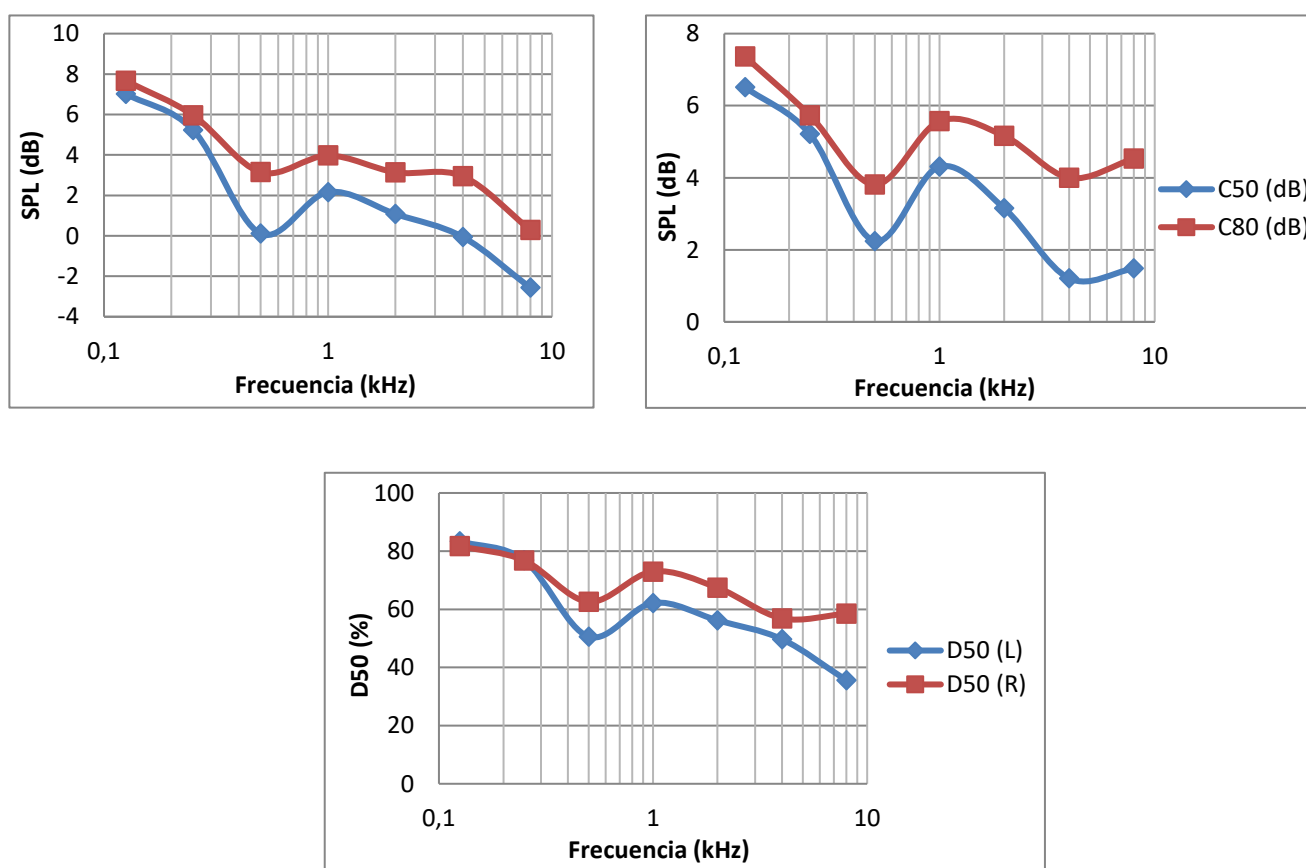
Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,107	2,652	2,626	6,51	7,36	81,7
250	1,746	3,419	3,515	5,21	5,73	76,8
500	2,343	3,813	30,333	2,24	3,81	62,6
1000	1,609	2,819	3,219	4,31	5,57	73
2000	1,048	2,402	2,412	3,15	5,16	67,4
4000	0,913	1,821	14,581	1,21	4	56,9
8000	0,799	1,343	14,512	1,48	4,53	58,5

**Tabla 5-14 Resultados Medición 3 con micrófono derecho**



**Figura5-15 EDT, T20 y T30 de la Medición 3**

Los tiempos de esta medición son algo más bajos con respecto las mediciones anteriores. Podemos ver que el EDT toma, mayoritariamente, valores entre 1 y 2 segundos. Los tiempos T20 y T30 llegan a 3 segundos, pero esta vez, caen mucho más rápido si nos movemos a frecuencias más altas (mismo comportamiento en ambas gráficas). Esta caída puede deberse al efecto de los materiales rodeaban este punto de medición (paredes, techos y escaleras). En la medición realizada con el oído derecho, volvemos a obtener valores anómalos en 500 Hz para el T30.



**Figura 5-2 C50, C80 y D50 de la Medición 3**

Ahora observamos valores de C50 y C80 más estables. En concreto, ambas variables presentan valores positivos para todo el rango de frecuencias, salvo alguna banda de C50. Este hecho nos indica que la energía entre 0 y 50 ms (y 80 ms) es mayor a la energía a partir de 50 ms (y 80 ms). Esto puede deberse al efecto de los materiales del techo (de la primera planta) y la pared, dado que esta medición se ha realizado al lado de la “Isla B”.

En cuanto a la definición, podemos ver que presenta un comportamiento más estable en comparación con las anteriores mediciones donde los valores mínimos estaban en torno al 20%. En esta medición, los valores mínimos son superiores al 40%, mayoritariamente.

### 5.1.6 Medición 4

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	0,61	1,295	1,711	4,16	8,51	72,3
250	0,825	1,454	2,456	1,96	4,55	61,1
500	1,058	1,593	2,183	0,47	3,66	52,7
1000	1,232	1,614	1,897	-1,12	2,26	43,6
2000	1,076	1,272	1,475	0,07	2,96	50,4
4000	0,71	0,919	1,011	2,47	5,59	63,8
8000	0,557	0,671	0,742	2,81	7,07	65,6

Tabla 5-16 Resultados Medición 4 con micrófono izquierdo

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	0,654	1,483	1,977	4,24	7,73	72,6
250	0,93	1,596	2,724	0,61	2,81	53,5
500	1,199	1,558	2,233	-1,71	1,6	40,3
1000	1,419	1,716	2,294	-4,66	-0,24	25,5
2000	1,156	1,422	1,665	-3,13	0,06	32,7
4000	0,88	1,01	1,103	-2,54	1,95	35,8
8000	0,688	0,745	0,782	-0,1	4,5	49,4

Tabla 5-17 Resultados Medición 4 con micrófono derecho

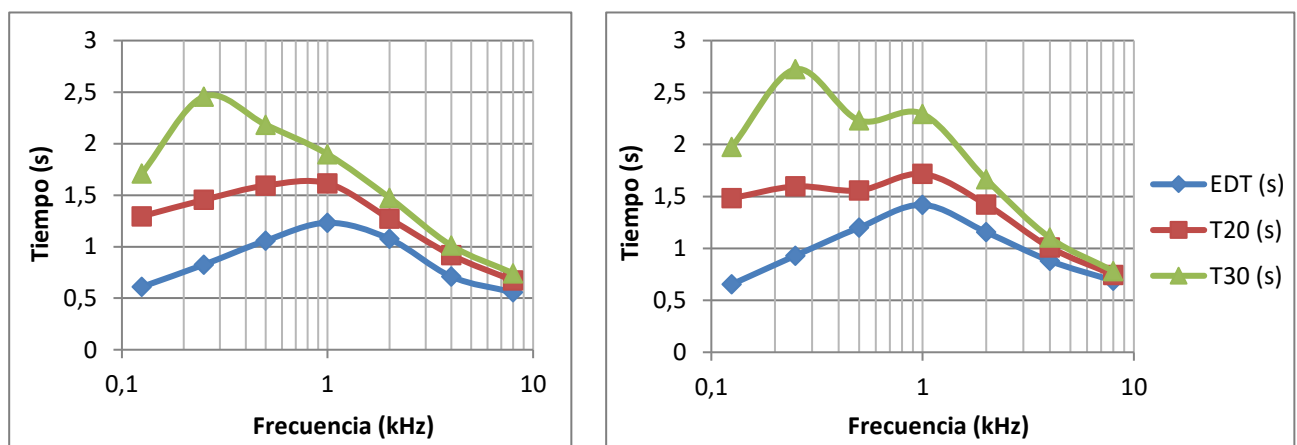
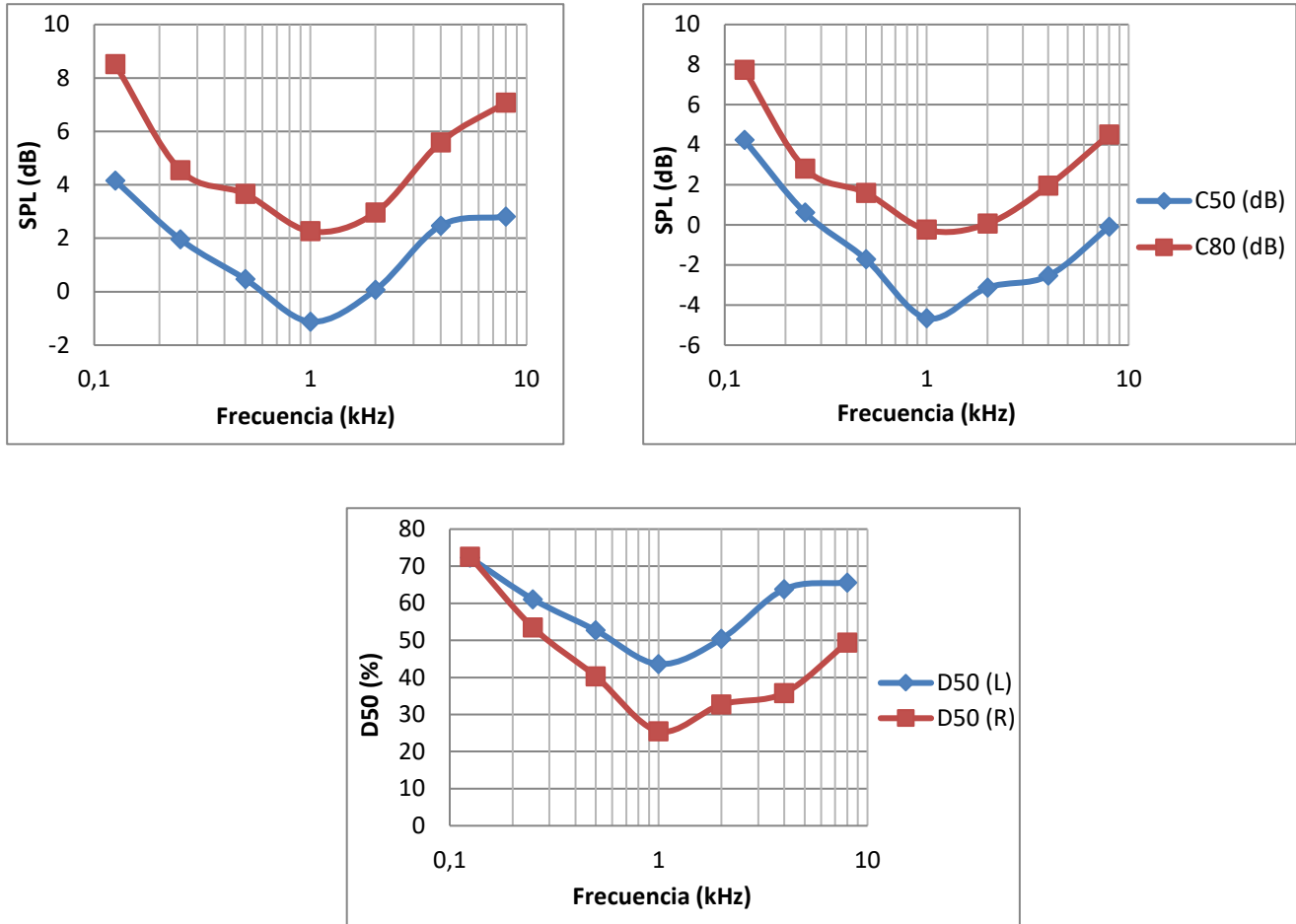


Figura 5-18 EDT, T20 y T30 de la Medición 4

Sin duda, esta es la medición con tiempos de reverberación más bajos. Estamos ante tiempos algo superiores a 2 segundos para el T30, entre 1 y 2 segundos para el T20 y cercanos a 1 segundo para el EDT. De nuevo, con el aumento de la frecuencia, los tiempos disminuyen progresivamente llegando a valores inferiores a 1 segundo.



**Figura5-19 C50, C80 y D50 de la Medición 4**

Observamos que los valores de claridad y definición tienen un comportamiento diferente al de resto de mediciones. La claridad musical presenta un nivel SPL de unos 2-3 dB mayor a la claridad de la palabra en todo el rango de frecuencias. Ambos parámetros se comportan de manera similar, descienden lentamente hasta 1 kHz, y vuelven a aumentar a partir de esta frecuencia. También podemos ver que la claridad de la palabra presenta valores negativos entre 500 Hz y 2 kHz para el oído izquierdo y entre 300 Hz y 8 kHz para el oído derecho. La claridad musical presenta valores positivos para todas las frecuencias del oído izquierdo y para la mayoría del oído derecho. Como ya vimos, esto implica que la energía entre 0 y 80 ms es mayor a la energía a partir de 80 ms.

En cuanto a la definición, observamos que ambas medidas presentan también diferencias. En concreto, podemos ver que los valores obtenidos con el micrófono izquierdo son mayores a los obtenidos con el derecho, como ocurría con la claridad.

### 5.1.7 Discusión de los resultados

Atendiendo a los resultados obtenidos en la Plaza Mayor, se pueden observar bastantes diferencias entre cada punto de medida. En general, podemos decir que estamos ante un espacio bastante reverberante, salvo en los puntos F4 y F5, que se encuentran rodeados de mayor superficie, como techos o paredes (sobre todo F5). Ahora, vamos a discutir sobre los resultados obtenidos para cada medición teniendo en cuenta los valores recomendados que vimos en el apartado 3.3.7.

Medición	Oído	EDT <sub>mid</sub> (s)	T20 <sub>mid</sub> (s)	T30 <sub>mid</sub> (s)	C50 <sub>Avr</sub> (dB)	C80 <sub>3</sub> (dB)	D50 <sub>Avr</sub> (%)
1	L	3,07	2,96	3,53	-7,21	2,54	40,82
	R	2,48	2,94	3,11	-5,82	6,29	44,37
2	L	1,43	1,35	1,49	-4,10	-5,27	52,48
	R	1,41	1,42	1,60	-2,01	-4,92	60,82
2.2	L	3,10	2,81	2,89	-5,13	-4,73	39,98
	R	2,99	2,69	2,84	-5,80	-5,97	38,38
3	L	1,67	2,83	3,01	0,92	3,42	63,17
	R	1,98	3,32	16,78	2,82	4,85	69,73
4	L	1,15	1,60	2,04	0,43	2,96	57,32
	R	1,31	1,64	2,26	-3,15	0,47	43,40

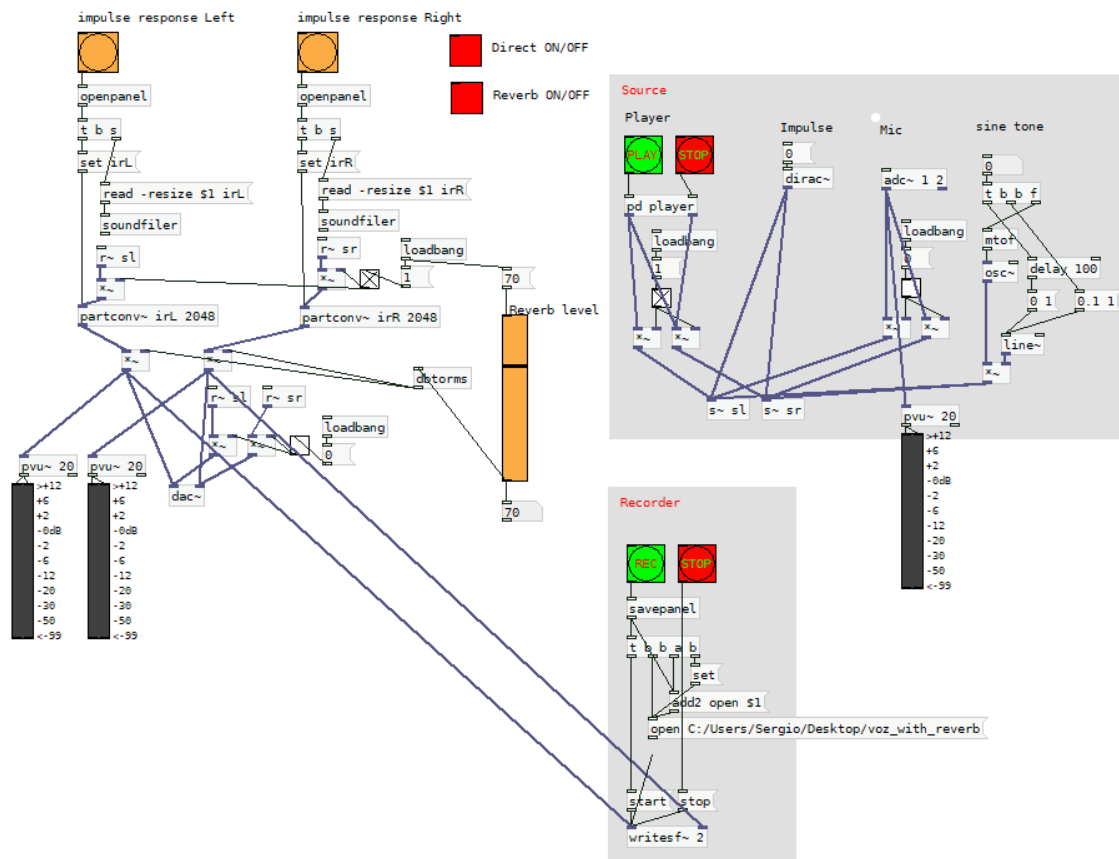
**Tabla 5-20 Valores representativos de la Plaza Mayor**

- **Medición 1:** vemos que los tiempos medios T20 y T30 están en torno a los 3 segundos. Esto implica que no es un espacio bueno para la palabra. Otro indicativo que nos confirma este hecho es el valor de C50<sub>Avr</sub>. Podemos ver que se encuentra muy por debajo de los valores recomendados para la palabra. Por otro lado, también tenemos un valor de D50<sub>Avr</sub> por debajo de lo recomendado (menor de 50%) en salas de teatro y palabra, pero está en un valor recomendado para salas multiusos. Por último, vemos que el C80<sub>3</sub> es muy superior a 0 dB. Teniendo en cuenta el C80<sub>3</sub> y los valores medios de T20, T30 y EDT, podemos decir que esa zona de la Plaza Mayor no es un mal lugar para la escucha de música, teniendo en cuenta que no es un espacio diseñado con ese fin.
- **Medición 2:** en esta medición no podemos tener en cuenta los valores medios obtenidos para los tiempos de reverberación, dado el comportamiento anómalo que presentaban dichas variables. Si no tenemos en cuenta estos resultados anómalos, podemos ver que en general, tenemos menos reverberación que la medición anterior, pero seguimos teniendo valores superiores 2 segundos en T20, T30 y en EDT. En cuanto a la claridad, tenemos valores de C50<sub>Avr</sub> y C80<sub>3</sub> por debajo de los valores recomendados para la palabra y música, respectivamente. En cambio, los valores de D50<sub>Avr</sub> son superiores a 50%. Atendiendo a estos resultados, podemos decir que este punto de la Plaza Mayor no es muy adecuado para la escucha de música ni voz.

- **Medición 2.2:** de nuevo, los tiempos medios de reverberación son superiores a 2 segundos, lo que nos indica que no será un espacio adecuado para la palabra, pero quizás si sea adecuado para conciertos musicales. Por otro lado, vemos como el valor de  $C50_{Avr}$  está muy por debajo de los valores recomendados para voz y el valor de  $D50_{Avr}$  también es inferior al 50%. Por lo tanto, podemos confirmar que no es un buen punto para la palabra. Por último, vemos que el valor de  $C80_3$  se encuentran algo por debajo del valor recomendado por Beranek para salas de conciertos. Podemos decir que no sería un punto desaconsejado para la escucha de música, a pesar de no ser un espacio confinado para ello.
- **Medición 3:** los tiempos medios  $T20$  y  $T30$  son muy cercanos a 3 segundos. A diferencia de las anteriores medidas, ahora tenemos un valor  $EDT_{mid}$  por debajo de 2 segundos. Esto es un indicativo de que podemos estar ante un punto, subjetivamente, adecuado para voz y música (aunque los valores  $T20_{mid}$  y  $T20_{mid}$  sean mayores a los recomendados). También vemos que el valor de  $C50_{Avr}$  es muy cercano a 1 dB y el valor de  $C80_3$  es superior a 3 dB. Por último, vemos que los valores de  $D50_{Avr}$  se encuentran muy por encima del 50% recomendado para la palabra. Podemos decir que este punto de la Plaza Mayor podría ser adecuado tanto para música como para voz. No olvidemos que seguimos teniendo tiempos de reverberación algo superiores a los recomendados sobre todo para voz.
- **Medición 4:** vemos esta medición presenta tiempos de reverberación bastante menores a las anteriores mediciones. En concreto, tenemos un valor de  $T20_{mid}$  por debajo de 2 segundos y un valor de  $T30_{mid}$  en torno a 2 segundos. El valor de  $EDT_{mid}$  se encuentra algo por debajo del valor recomendado por Beranek para salas multiusos. De nuevo, podemos estar en un buen punto para la palabra y música. En cuanto al valor de  $C50_{Avr}$ , vemos que se encuentra por encima de los 0 dB. El  $C80_3$  toma un valor muy cercano a 3 dB. Podemos decir que es un espacio adecuado para la escucha de música. Por otro lado, valor de  $D50_{Avr}$  se encuentra por encima del 50%. Por lo tanto, no es un punto desaconsejado para la palabra. A pesar de los resultados obtenidos, hay que tener en cuenta que esta medición tenía las fuentes situadas en la entreplanta de uno de los accesos de la Plaza Mayor, por lo que es un espacio pequeño y por lo tanto poco adecuado para cualquier actividad de voz o música.

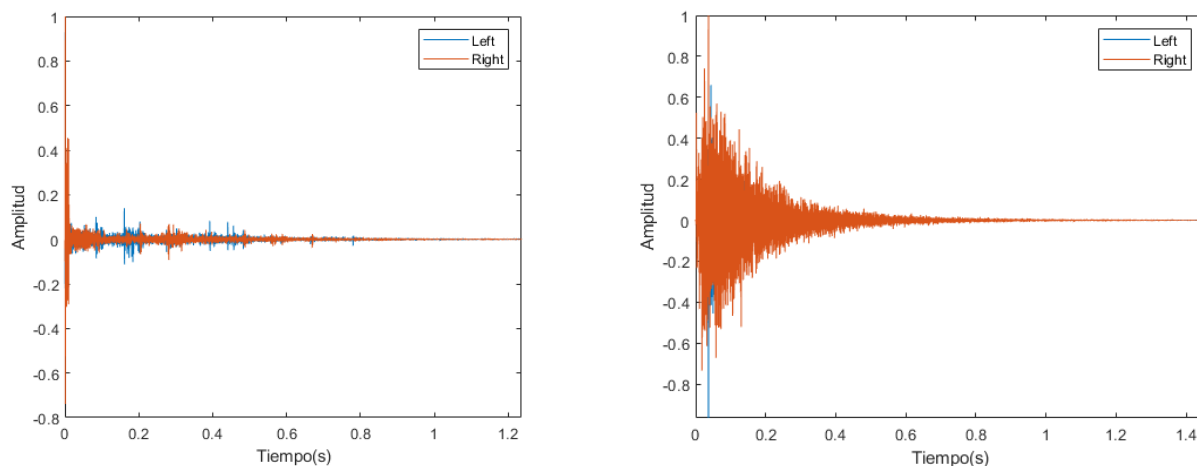
### 5.1.8 Recreación sonora

Para la recreación sonora o auralización experimental realizada en este TFG, se ha empleado el software Pure-Data como procesador digital de señal con la siguiente configuración:

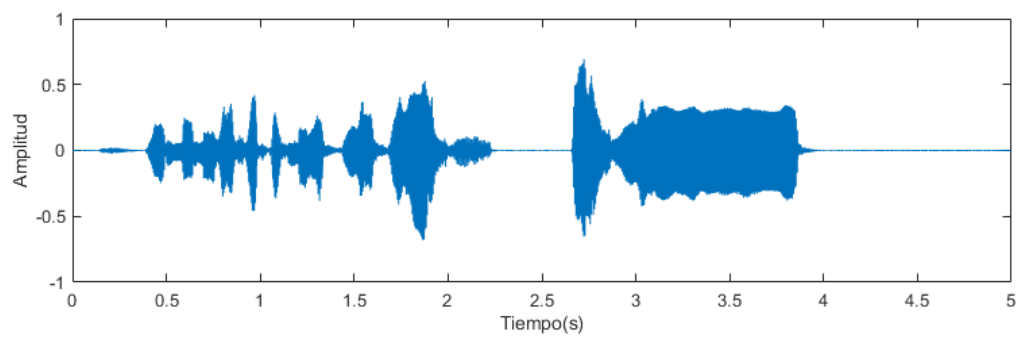


**Figura 5-3 Sistema empleado en la auralización experimental**

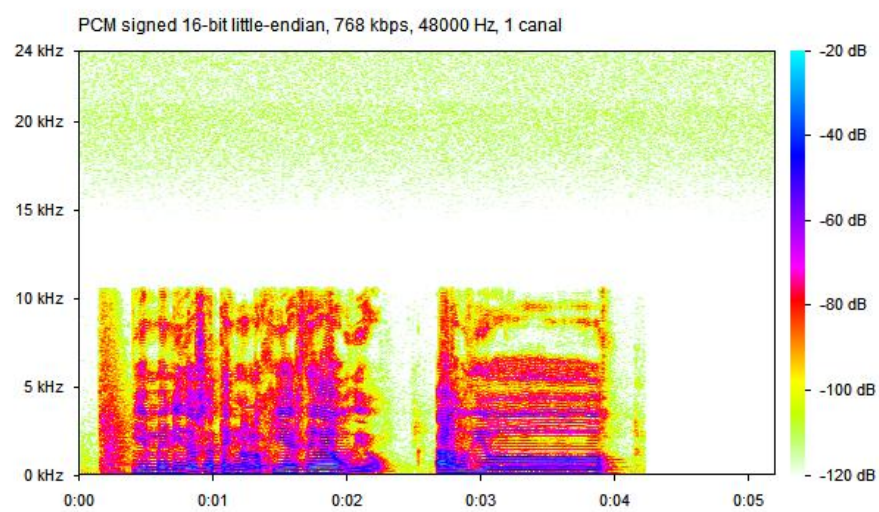
Como ejemplo, se han empleado las respuestas al impulso binaurales obtenidas en la Medición 1 y 4. Como señal de entrada, se ha empleado un audio de voz “seca” (*dry*) con una codificación PCM y 16 bits por muestra.



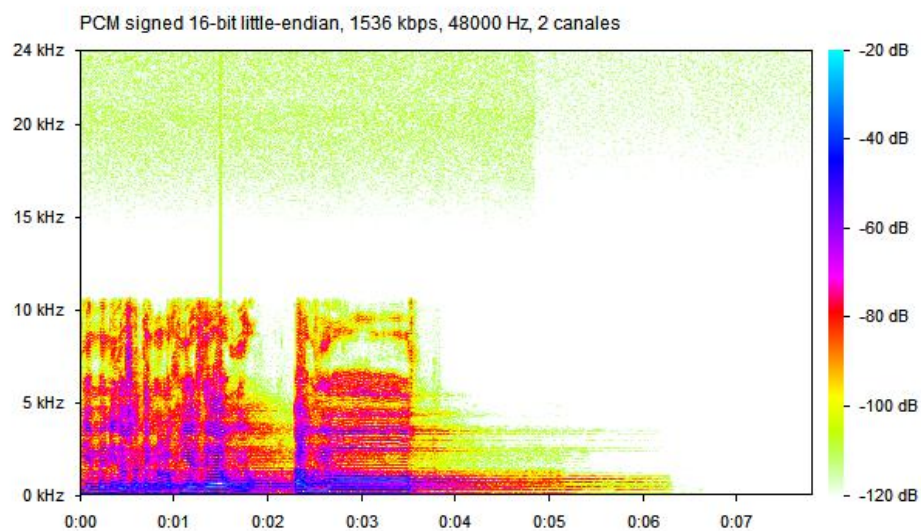
**Figura 5-4 Respuesta al impulso binaural de la Medición 1 y 4**



**Figura 5-5 Señal de entrada**

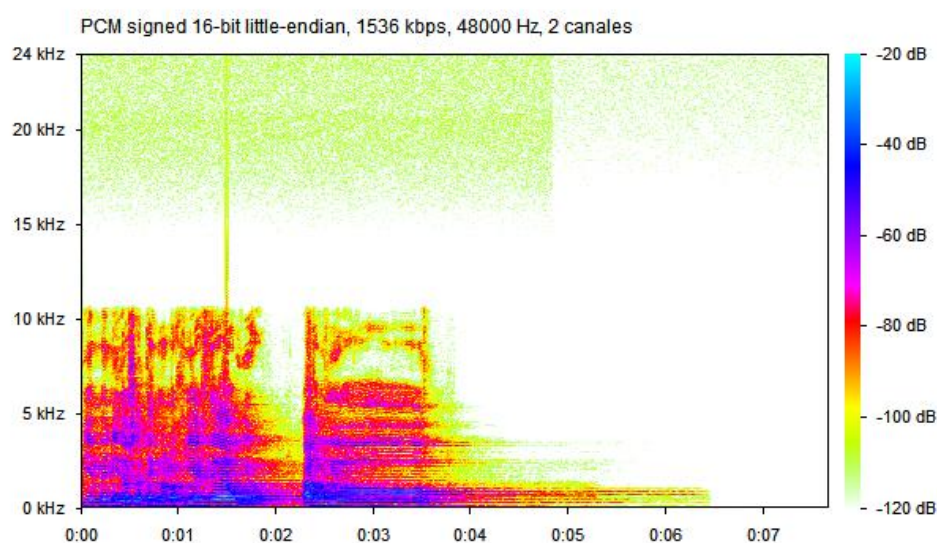


**Figura 5-6 Espectrograma de la señal de entrada**



**Figura 5-7 Espectrograma de la señal auralizada (Medición 1)**





**Figura 5-8 Espectrograma de la señal auralizada (Medición 4)**

Tras la auralización, podemos observar el efecto de la convolución en el espectro, sobre todo en los silencios de la señal de voz de entrada. Este experimento nos permite obtener una aproximación de la sonoridad de la Plaza Mayor en esos puntos (fuente/micrófono) evaluados.

Hay que tener en cuenta que, en esta auralización, no se ha considerado la ganancia de la señal de entrada, es decir, el nivel de presión sonora registrada por el receptor en el momento en el que se hizo la medición.

## 5.2 Sala polivalente

Como adelantamos en el capítulo 4.2, en esta sala se han realizado dos tipos de medidas. En ambas medidas, la posición de la fuente era fija, mientras que el micrófono se iba situando en un punto diferente del espacio.

### 5.2.1 Mediciones con micrófono binaural

La primera medida en este espacio se realizó con el micrófono binaural en doce puntos diferentes y las fuentes en F1. A continuación, y como propone la norma ISO 3382-2:2008 [5], se muestran los valores medios obtenidos de cada variable y para cada frecuencia:

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,100	2,171	2,210	-4,093	-1,365	28,583
250	1,946	2,017	2,014	-3,573	-0,103	32,633
500	1,791	1,888	1,935	-1,715	0,470	40,942
1000	1,624	1,999	2,091	-0,701	2,328	46,842

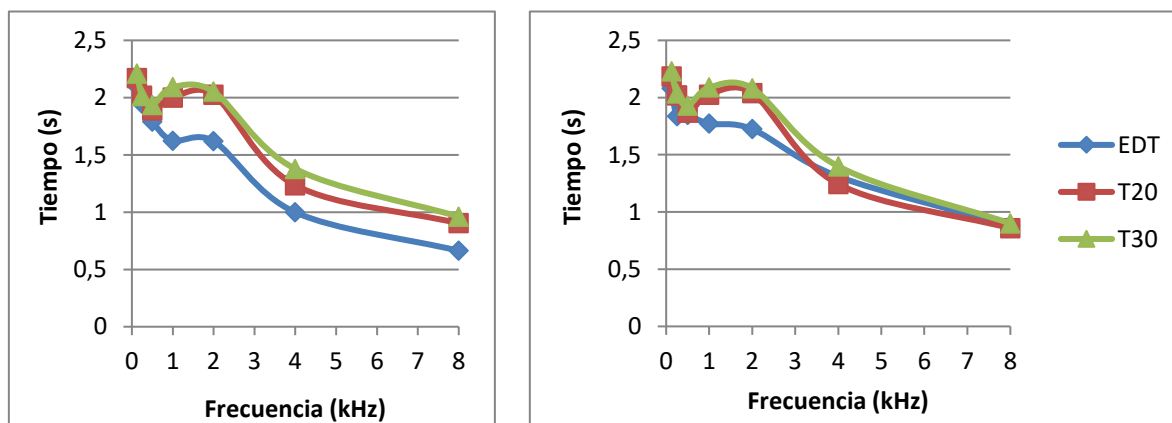
<b>2000</b>	1,620	2,025	2,052	-0,364	2,672	50,775
<b>4000</b>	0,999	1,235	1,378	2,753	6,883	66,142
<b>8000</b>	0,663	0,903	0,961	2,723	7,538	65,008

**Tabla 5-21 Valores medios obtenidos con micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
<b>125</b>	2,082	2,185	2,229	-4,434	-1,068	27,067
<b>250</b>	1,838	2,019	2,035	-3,542	0,064	32,350
<b>500</b>	1,848	1,868	1,929	-1,428	0,714	42,142
<b>1000</b>	1,772	2,026	2,088	-0,195	1,768	49,500
<b>2000</b>	1,724	2,040	2,081	0,530	2,258	54,492
<b>4000</b>	1,310	1,244	1,399	3,625	5,773	69,117
<b>8000</b>	0,879	0,858	0,900	3,563	6,103	68,067

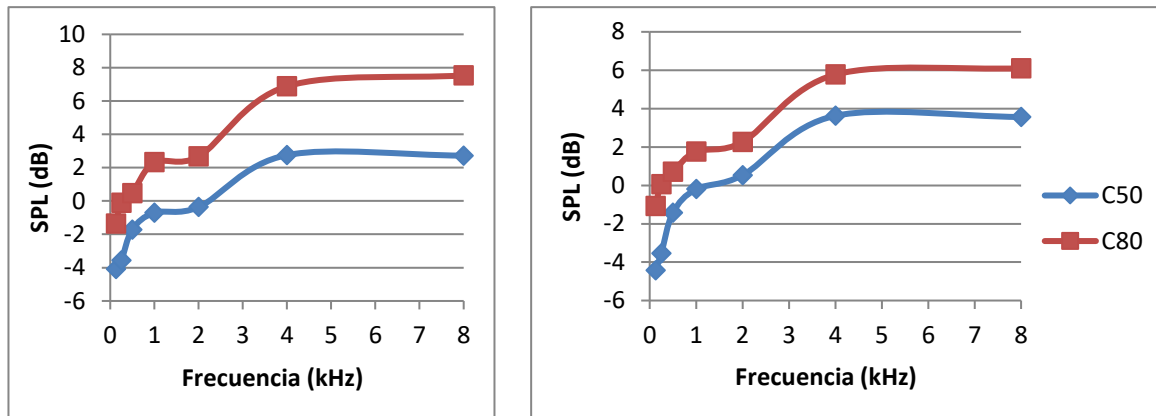
**Tabla 5-22 Valores medios obtenidos con micrófono derecho**

En el A.A, se incluyen las tablas de resultados de cada punto de medida.



**Figura 5-9 Valores medios de EDT, T20 y T30 (binaural)**

Observamos que los tiempos máximos de reverberación se encuentran algo por encima de 2 segundos. Conforme nos movemos a frecuencias mayores, observamos que decrecen progresivamente, llegando a tomar valores por debajo de 1 segundo. En general, salvo el EDT, las mediciones de los dos micrófonos se comportan de igual manera. También podemos observar que los valores T20 y T30 son muy similares entre sí.

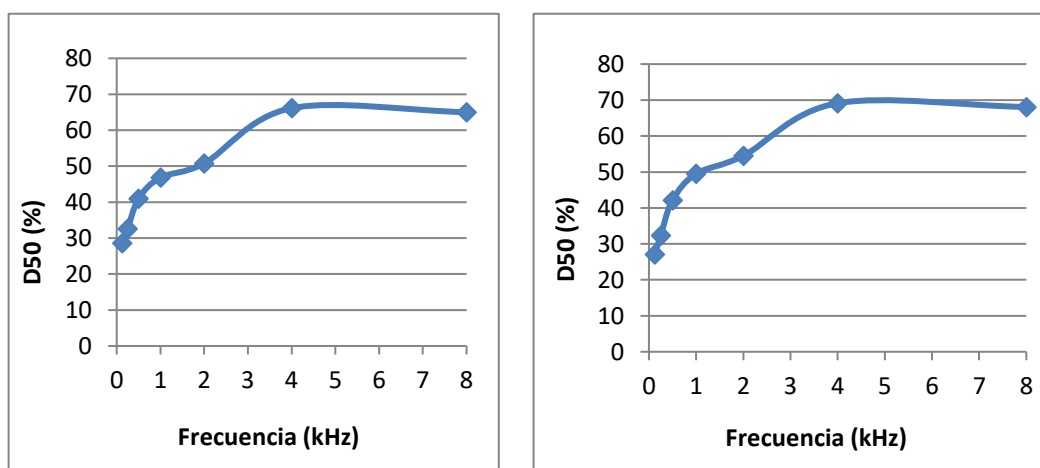


**Figura 5-10 Valores medios de C50 y C80 (binaural)**

Podemos observar que la claridad tiene un comportamiento muy diferente con respecto al obtenido en las mediciones de la Plaza Mayor.

En bajas frecuencias, los valores de claridad de voz son negativos, esto es, la energía a partir de 50 ms es mayor a la energía entre 0 y 50 ms para esas frecuencias. En torno a 2 kHz, ocurre lo contrario: la energía es mayor entre 0 y 50 ms para ese rango frecuencia. Esto puede ser debido al efecto absorbente de los materiales de la sala, que también veíamos reflejado en el decrecimiento de los tiempos de reverberación con el aumento de la frecuencia.

La claridad musical se comporta de manera similar que la claridad de voz, pero con valores algo mayores para todo el rango de frecuencias. Si nos movemos a frecuencias mayores, los valores de claridad se ven aumentados varios decibelios. A partir de 4 kHz, se mantienen estables. También podemos ver que, a partir de esta frecuencia, hay una diferencia de 1 dB, aproximadamente, entre los valores de claridad de voz de ambas mediciones.



**Figura 5-11 Valores medios de D50 (binaural)**

Con respecto a la definición de la sala, podemos observar que los valores crecen si aumentamos la frecuencia, como ocurría con la claridad. A partir de 4 kHz, los valores se mantienen constantes en torno al 70%. De nuevo, la gráfica obtenida con el micrófono derecho presenta valores algo superiores a la obtenida con el izquierdo.

Este comportamiento puede deberse a la geometría de la sala y a los diferentes materiales que la recubren. De hecho, a la izquierda del sujeto de medida, la sala está cubierta de ventanas (teniendo en cuenta que el cristal es mal absorbente sonoro) lo que puede propiciar una menor claridad y definición de sonido, dado que aumenta las reflexiones del sonido.

## 5.2.2 Mediciones con micrófono omnidireccional

Esta medida tiene como propósito verificar los valores obtenidos en la anterior medición. Se ha realizado en seis puntos de medida, empleados en la medición anterior, y con el micrófono omnidireccional de medida.

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,022	2,164	2,196	-2,747	-0,238	35,333
250	2,056	1,969	2,036	-4,262	-1,685	27,817
500	1,900	1,907	1,933	-0,733	1,152	46,317
1000	1,801	2,122	2,174	0,568	2,455	53,150
2000	1,770	2,143	2,192	1,273	2,818	57,033
4000	1,181	1,543	1,646	3,590	5,730	69,317
8000	0,887	0,910	1,033	6,872	9,645	82,483

Tabla 5-23 Valores medios de la medición omnidireccional

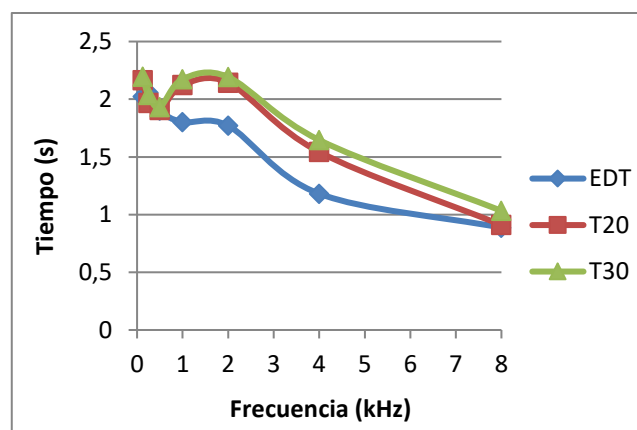
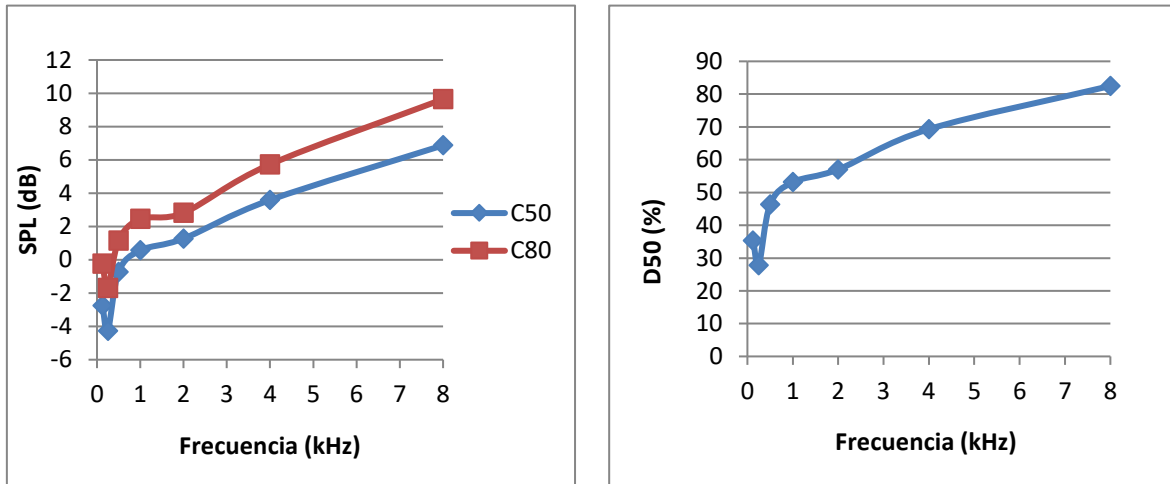


Figura 5-12Valores medios de EDT, T20 y T30 (omnidireccional)

Podemos ver que los tiempos de reverberación se comportan de forma similar que en la medición binaural. Los máximos son superiores a 2 segundos y se encuentran en torno a 1 kHz y 2 kHz. Si nos movemos a frecuencias más altas, estos tiempos decrecen progresivamente, pero con menor pendiente respecto a la medición binaural. Esto puede deberse a que en esta medición no se han evaluado puntos con menor tiempo de

reverberación. Recordemos que con este micrófono solo se han realizado medidas en seis puntos diferentes frente a los doce de la medición binaural.



**Figura 5-13 Valores medios de C50, C80 y D50 (omnidireccional)**

Observamos que las tres variables se comportan de manera similar hasta los 4 kHz. A partir de esta frecuencia, los valores de los tres parámetros siguen aumentando progresivamente, sin mantenerse estables. De nuevo, la causa de esto puede deberse al diferente número de puntos de análisis entre las dos mediciones realizadas en este espacio. También puede deberse al cambio de posición de las fuentes sonoras.

### 5.2.3 Discusión de los resultados

La siguiente tabla refleja los valores únicos representativos de cada parámetro acústico. Para generarla, primero se ha calculado el promedio de cada variable para cada frecuencia (ver tablas Tabla 5-21 y Tabla 5-22). Con estos valores, se han calculado los más representativos gracias a la formulación que vimos en el capítulo 17.

Medición	EDT <sub>mid</sub> (s)	T20 <sub>mid</sub> (s)	T30 <sub>mid</sub> (s)	C50 <sub>Avr</sub> (dB)	C80 <sub>3</sub> (dB)	D50 <sub>Avr</sub> (%)
<b>Left</b>	1,71	1,94	2,01	0,13	1,82	44,32
<b>Right</b>	1,81	1,95	2,01	0,83	1,58	45,78

**Tabla 5-24 Valores representativos de la Sala polivalente (binaural).**

Si comparamos los resultados obtenidos con los valores recomendados por Beranek, podemos observar que los tiempos de reverberación corresponden a los valores recomendados para salas multiusos o de concierto. Los valores de claridad musical y claridad de la palabra también se encuentran en el rango recomendado para salas multiusos. Por otro lado, los valores de definición también se encuentran en el rango recomendado para este tipo de salas (entre 40 a 50%). Por lo tanto, los resultados obtenidos en la Sala polivalente han sido los esperados según Beranek.

Podemos decir que ha sido un espacio bien diseñado acústicamente para desarrollar actividades de música y habla, es decir, para salas multiusos. En general, es un espacio con un comportamiento muy uniforme.

En la siguiente tabla podemos ver los valores más representativos obtenidos con el micrófono omnidireccional. Salvo en los valores de claridad, observamos resultados muy similares a los obtenidos con el micrófono binaural. Como vimos en el apartado anterior, esto puede deberse a que en esta medición solo se evaluaron seis puntos, frente a los doce de la medición binaural.

Medición	EDT <sub>mid</sub> (s)	T20 <sub>mid</sub> (s)	T30 <sub>mid</sub> (s)	C50 <sub>Avr</sub> (dB)	C80 <sub>3</sub> (dB)	D50 <sub>Avr</sub> (%)
Omnidireccional	1,85	2,01	2,05	1,38	2,14	48,16

Tabla 5-25Valores representativos de la Sala polivalente (omnidireccional).

### 5.2.4 Recreación sonora

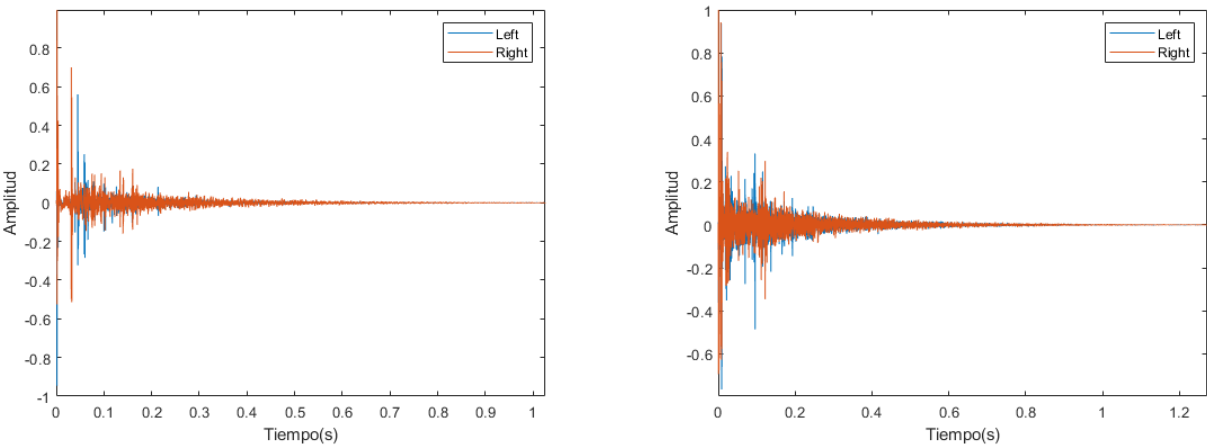
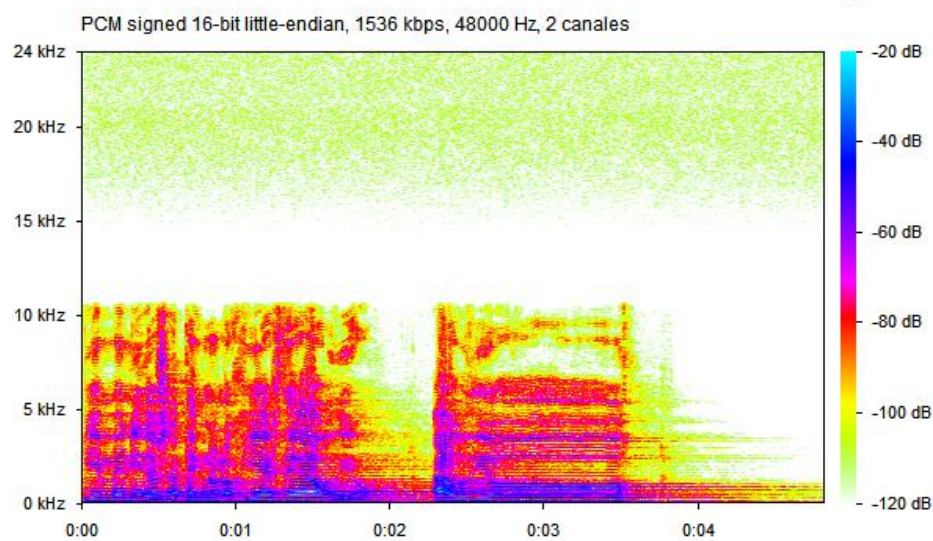
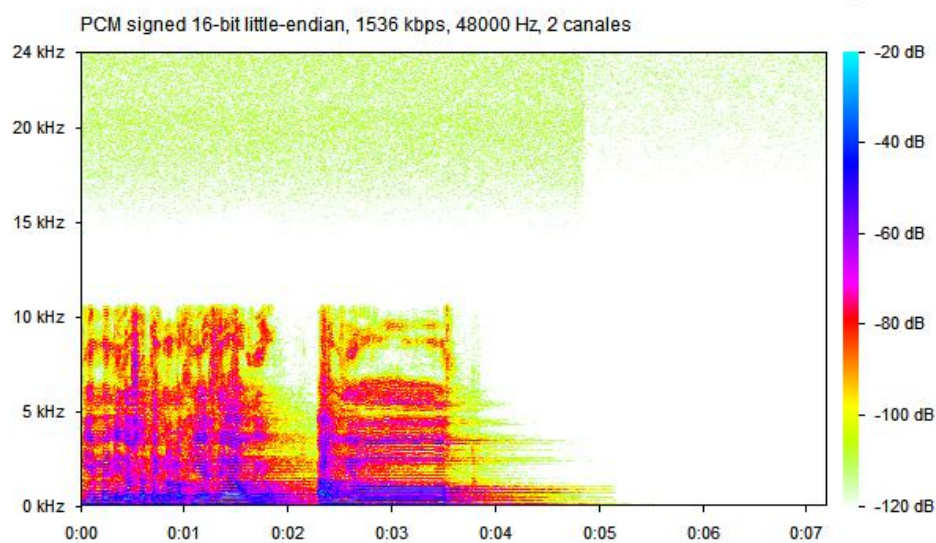


Figura 5-14 Respuesta al impulso binaural obtenida en P4 y P12

De forma análoga al apartado 5.1.8, hemos auralizado la señal de entrada con dos respuestas al impulso binaurales. En este caso, las respuestas obtenidas en los puntos 4 y 12. A continuación, se muestran los espectrogramas obtenidos tras la auralización de la señal de entrada.



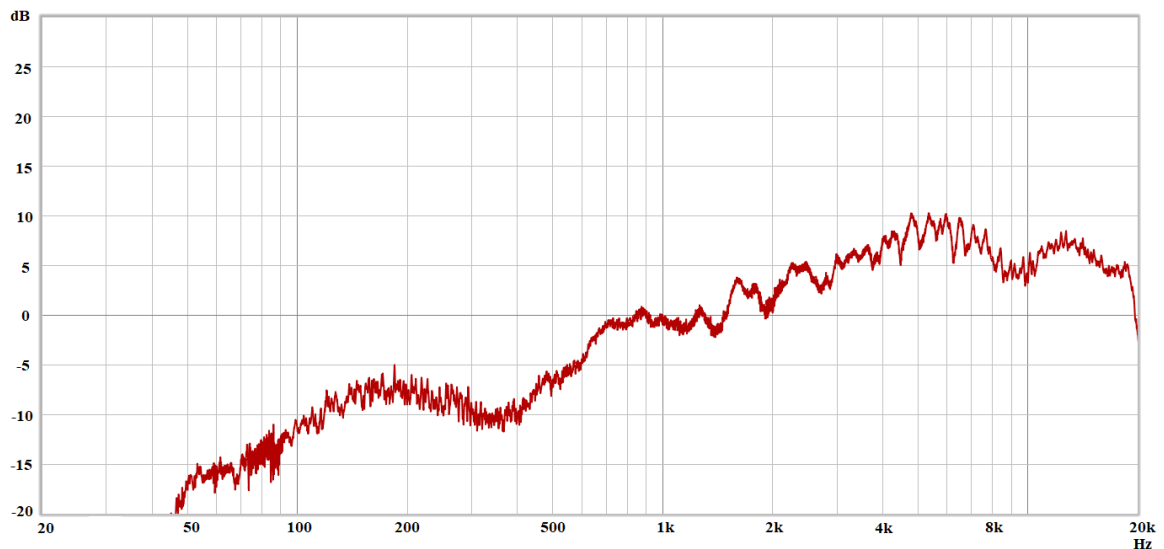
**Figura 5-15 Espectrograma de la señal auralizada (P4)**



**Figura 5-16 Espectrograma de la señal auralizada (P12)**

### ***5.3 Medición de la fuente sonora***

De forma adicional, se ha realizado una medición a la fuente empleada en este TFG. Esta medición se ha realizado con el fin de comprobar la respuesta en frecuencia de los monitores. Para esta medición, se ha empleado el micrófono omnidireccional de medida y se ha colocado, aproximadamente, a un metro de la fuente sonora.



**Figura 5-17 Respuesta en frecuencia de la fuente sonora**

Podemos ver que por debajo de los 700 Hz el nivel de presión por debajo está muy por debajo de los 0 dB. Si nos movemos a frecuencias más altas, observamos que los valores tienden a aumentar progresivamente, llegando a valores por encima de 5 dB en torno a 6 kHz. En definitiva, podemos decir que estamos ante una fuente sonora que dista mucho de tener una respuesta plana y, como vimos en el apartado 5.1, tiene limitaciones de potencia.



## 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Conclusiones

En este TFG se ha realizado un estudio acústico de dos espacios de la Universidad Autónoma de Madrid, la Plaza Mayor y la Sala polivalente. Para el desarrollo de este estudio, se han realizado diferentes medidas en cada espacio.

Una vez obtenidos los resultados de cada medida, se ha podido observar que la Plaza Mayor es un espacio muy reverberante pero no muy desfavorable, en ciertos puntos, para la escucha de música, a pesar de no haber sido diseñado para este propósito. En cambio, no es un espacio muy adecuado para la inteligibilidad de la palabra por ser un espacio tan reverberante. También se ha comprobado que las fuentes empleadas, además de no tener una respuesta plana, no tenían la suficiente potencia para radiar este espacio. Además, es probable que este espacio presente ciertas resonancias en altas frecuencias. Generalmente en la zona central del espacio.

En cuanto a la Sala polivalente, se ha comprobado que los resultados obtenidos son los esperados para este tipo de salas según Beranek. Por lo tanto, estamos ante un espacio muy apropiado para voz y música.

### 6.2 Trabajo futuro

Tras el desarrollo de este TFG se pueden abrir diferentes líneas de investigación que pueden dar pie a trabajos futuros. Una de ellas es el desarrollo de la auralización mediante el proceso explicado en el apartado 2.6. Es decir, obtener la respuesta al impulso en cualquier punto de la sala mediante el modelo 3D de ésta, los coeficientes de absorción de cada superficie y un software de modelación acústica.

Otra línea de investigación podría ser añadir información visual a la auralización. Es decir, captar con una cámara el espacio bajo estudio y que el usuario pueda interactuar con lo sonoro y lo visual.

Por otro lado, sería interesante estudiar otro tipo de espacios urbanos, no diseñados para voz y música, para darles una aplicación de este tipo. Otra opción, podría ser el estudio acústico de algún edificio en desuso con el fin de su posible reutilización, ya sea en los ámbitos tratados en este TFG o en tareas que requieran unas determinadas condiciones acústicas. Además, sería adecuado emplear otros altavoces con mayor potencia y con respuesta en frecuencia más plana para obtener unos resultados mucho más fieles a la realidad.

# Referencias

---

- [1] Leo L. Beranek, “Acoustics”, 1986, pp. 3, 13
- [2] A. Carrión Isbert, “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Ediciones UPC, 1998, pp. 27, 226, 231, 369.
- [3] J. Ortega García, «Sistema Auditivo, Sensación Sonora y Parametrización Perceptual» de Tratamiento de Señales de Voz y Audio.
- [4] Thomas D. Rossing, “Springer Handbook of Acoustics” Springer, 2007, pp. 3, 4, 307
- [5] Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008)
- [6] Antonio Pedrero González, “Restauración virtual del patrimonio sonoro. Aplicación al antiguo rito hispánico” UPM, 2014, p. 245
- [7] D. F. Hidalgo Patiño, “Medición y Análisis de Parámetros Acústicos en diez salas de conciertos y teatros de Bogotá”, 2009, pp. 34, 35.
- [8] A. Quilis & M. Esgueva, “Realización de los fonemas vocálicos españoles en posición fonética normal”, 1983.
- [9] J. González Rodríguez, «Acústica arquitectónica» de Ingeniería Acústica, pp. 74-76
- [10] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky & S. Hamid Nawab, “Señales y Sistemas” Pearson, 1996, p. 78
- [11] D. Ramos Castro, «Procesado de Audio: Síntesis de Audio» de Tecnologías de Audio, pp. 3-7, 10, 11, 14, 18

## Anexos

### A Resultados Sala polivalente

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,213	1,85	2,126	-3,16	-1,99	32,6
250	1,53	1,921	1,911	5,46	6,37	77,8
500	1,738	1,857	1,859	6,08	6,93	80,2
1000	1,681	1,878	2,037	3,06	5,73	66,9
2000	1,728	2,003	2,034	1,17	3,54	56,7
4000	1,778	1,08	1,231	9,68	12,65	90,3
8000	0,037	0,865	0,85	10,03	14,09	91

Tabla 0-1 Medición en P1 con el micrófono izquierdo

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,04	2,063	2,233	-3,81	-0,97	29,4
250	1,669	2,051	1,931	5,36	6,28	77,5
500	1,877	1,857	1,846	5,95	6,89	79,7
1000	1,651	2,012	2,063	3,17	4,44	67,5
2000	1,74	1,998	2,06	1,15	2,11	56,6
4000	2,093	1,085	1,273	9,62	11,53	90,2
8000	0,742	0,825	0,865	6,12	8,49	80,4

Tabla 0-2 Medición en P1 con el micrófono derecho

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,074	2,147	2,302	-3,41	-2,41	31,3
250	1,931	2,064	1,989	-0,51	1,01	47,1
500	1,885	1,841	1,852	2,48	4,03	63,9
1000	1,682	1,977	2,013	3,09	3,89	67,1
2000	1,613	2,093	2,076	5,4	6,04	77,6
4000	1,218	1,204	1,37	7,89	8,64	86
8000	0,566	0,903	0,985	8,37	9,5	87,3

Tabla 0-3 Medición en P2 con el micrófono izquierdo

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,013	2,247	2,29	-3,26	-1,39	32,1
250	1,613	2,151	2,078	-4,3	-0,68	27,1
500	1,714	1,967	1,915	1,95	3,12	61
1000	1,652	2,056	2,103	4,32	5,03	73
2000	1,699	2,059	2,075	4,87	5,68	75,4
4000	1,37	1,143	1,351	3,29	4,1	68,1
8000	1,143	0,783	0,875	-0,27	1,07	48,4

Tabla 0-4 Medición en P2 con el micrófono derecho

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,224	2,212	2,152	-2,73	0,37	34,8
250	1,976	2,083	2,054	-8,82	-0,27	11,6
500	1,72	1,9	1,904	-4,81	-2,24	24,8
1000	1,59	1,84	1,973	-8,25	-0,44	13
2000	1,548	2,026	2,05	-15,01	-0,74	3,1
4000	0,577	1,286	1,427	-16	5,19	2,5
8000	0,566	0,957	1,003	-16,41	6,96	2,2

**Tabla 0-5 Medición en P3 con el micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,414	2,132	2,185	-2,91	0,47	33,8
250	1,883	1,882	1,973	-6,31	-1,32	19
500	1,671	1,823	1,909	-3,42	-1,87	31,3
1000	1,914	1,937	1,995	-8,04	-3,87	13,6
2000	1,688	2,049	2,088	-11,25	-6,3	7
4000	1,011	1,336	1,48	-10,72	-4,15	7,8
8000	1,008	0,901	0,923	-9,52	-4,53	10

**Tabla 0-6 Medición en P3 con el micrófono derecho**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,063	2,322	2,339	-5,28	2,2	22,9
250	1,917	2,114	2,118	-1,65	1,56	40,6
500	1,495	1,887	1,873	1,44	3,51	58,2
1000	1,371	2,04	2,075	0,61	3,23	53,5
2000	1,659	2,021	2,035	-2,4	0,88	36,5
4000	0,75	1,108	1,281	5,26	9,49	77,1
8000	0,594	0,828	0,9	4,25	8,83	72,7

**Tabla 0-7 Medición en P4 con el micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,875	2,226	2,261	-7,86	1,22	14,1
250	1,804	1,996	2,108	-2,74	0,66	34,7
500	1,838	1,898	1,897	1,95	3,77	61
1000	1,522	2,031	2,076	1,2	2,76	56,9
2000	1,71	2,009	2,096	-0,62	1,42	46,5
4000	1,089	1,203	1,347	6,09	7,74	80,3
8000	0,78	0,837	0,892	5,3	7,18	77,2

**Tabla 0-8 Medición en P4 con el micrófono derecho**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,021	1,981	2,115	-6,92	-4,97	16,9
250	1,742	2,045	2,096	-6,77	-4,04	17,4
500	1,856	1,841	1,926	-1,29	-0,07	42,6
1000	1,63	1,953	2,033	3,59	4,54	69,6
2000	1,569	2,115	2,082	2,92	3,84	66,2

<b>4000</b>	0,899	1,329	1,449	5,68	6,57	78,7
<b>8000</b>	0,677	0,93	1,025	6,26	7,28	80,9

**Tabla 0-9 Medición en P5 con el micrófono izquierdo**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,065	2,142	2,2	-6,06	-3,28	19,9
<b>250</b>	1,891	1,968	2,041	-7,89	-2,48	14
<b>500</b>	1,914	1,866	1,955	-4,32	-2,11	27
<b>1000</b>	2	2,073	2,129	-0,63	1,65	46,4
<b>2000</b>	1,804	2,07	2,059	2,48	4,13	63,9
<b>4000</b>	0,995	1,307	1,449	3,86	6,29	70,9
<b>8000</b>	0,726	0,851	0,924	2,34	5,75	63,1

**Tabla 0-10 Medición en P5 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,366	2,144	2,124	-5	-1,94	24
<b>250</b>	2,235	1,96	1,886	-7,66	-1,33	14,6
<b>500</b>	1,647	1,955	2,018	-2,6	-0,03	35,5
<b>1000</b>	1,46	2,026	2,108	-3,4	1,97	31,4
<b>2000</b>	1,467	2,047	2,06	-0,56	3,79	46,8
<b>4000</b>	0,845	1,252	1,387	0,42	5,41	52,4
<b>8000</b>	0,762	0,989	0,986	-1,37	3,16	42,2

**Tabla 0-11 Medición en P6 con el micrófono izquierdo**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,408	2,243	2,154	-3,61	-0,74	30,3
<b>250</b>	1,869	2,001	2,005	-5,98	-1,37	20,1
<b>500</b>	1,8	1,767	1,88	-1,38	0,1	42,1
<b>1000</b>	1,757	1,97	2,06	-1,27	0,34	42,8
<b>2000</b>	1,827	1,982	2,044	3,36	4,49	68,4
<b>4000</b>	1,892	1,277	1,409	5,72	6,81	78,9
<b>8000</b>	1,557	0,9	0,913	4,81	6,08	75,1

**Tabla 0-12 Medición en P6 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,716	2,22	2,249	-4,2	1,39	27,6
<b>250</b>	1,596	1,977	2,036	-4,3	2,11	27,1
<b>500</b>	1,694	1,88	1,937	-2,5	1,04	36
<b>1000</b>	1,681	2,041	2,119	0,95	3,35	55,5
<b>2000</b>	1,593	2,033	2,085	-3,63	2,06	30,2
<b>4000</b>	0,938	1,22	1,377	4,16	7,04	72,2
<b>8000</b>	0,519	0,896	0,961	3,97	9,09	71,4

**Tabla 0-13 Medición en P7 con el micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	1,753	2,147	2,118	-4,82	0,6	24,8
250	1,841	2,055	1,996	-2,67	1,16	35,1
500	1,904	1,875	1,92	-2,95	0,62	33,6
1000	1,717	1,968	2,028	1,03	3,35	55,9
2000	1,709	2,096	2,095	-2,93	0,88	33,8
4000	1,017	1,268	1,409	3,01	6,8	66,7
8000	0,571	0,797	0,872	3,77	8,93	70,4

**Tabla 0-14 Medición en P7 con el micrófono derecho**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,107	2,19	2,319	-3,75	-2,17	29,7
250	2,128	1,94	1,964	-2,59	-0,25	35,5
500	1,743	1,874	2,012	-5,93	-3,85	20,3
1000	1,773	2,106	2,164	1,66	2,58	59,4
2000	1,744	2,056	2,072	2,51	3,05	64,1
4000	1,068	1,265	1,412	4,14	4,6	72,2
8000	1,048	0,852	0,982	5,47	6,01	77,9

**Tabla 0-15 Medición en P8 con el micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,161	2,214	2,304	-5,42	-2,19	22,3
250	1,846	1,897	1,97	-5,71	-0,66	21,2
500	1,933	1,887	2,042	-5,97	-2,85	20,2
1000	1,77	2,081	2,153	-1,01	1,33	44,2
2000	1,647	2,008	2,051	1,91	3,13	60,8
4000	1,121	1,305	1,459	1,95	4,78	61
8000	0,851	0,868	0,93	1,6	5,59	59,1

**Tabla 0-16 Medición en P8 con el micrófono derecho**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,012	2,171	2,084	-6,38	-3,36	18,7
250	1,991	1,919	2,032	-5,76	-2,42	21
500	1,915	1,922	1,973	-6,84	-0,76	17,1
1000	1,455	2,03	2,167	-1,87	2,94	39,4
2000	1,674	1,887	1,983	-0,15	3,14	49,1
4000	0,854	1,29	1,414	1,44	7,2	58,2
8000	0,572	0,896	0,962	-1,67	8,13	40,5

**Tabla 0-17 Medición en P9 con el micrófono izquierdo**

Frecuencia (Hz)	EDT (s)	T20 (s)	T30 (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (%)
125	2,056	2,177	2,217	-5,3	-3,19	22,8
250	1,956	1,959	2,13	-7,85	-2,18	14,1
500	1,637	1,763	1,912	-2,73	0,4	34,8
1000	1,723	1,995	2,089	2,28	4,11	62,8
2000	1,803	2,015	2,092	2,9	4,4	66,1

<b>4000</b>	1,608	1,272	1,407	5,42	6,77	77,7
<b>8000</b>	1,008	0,92	0,914	8,12	9,44	86,7

**Tabla 0-18 Medición en P9 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,891	2,322	2,216	-2,91	0,25	33,9
<b>250</b>	1,794	2,211	2,135	-1,22	1,83	43
<b>500</b>	2,045	1,886	1,989	-2,27	-0,43	37,2
<b>1000</b>	1,801	2,128	2,28	-1,52	0,43	41,3
<b>2000</b>	1,651	2,042	2,115	-0,15	0,83	49,2
<b>4000</b>	0,879	1,291	1,411	5,36	6,4	77,4
<b>8000</b>	0,525	0,898	0,951	7,25	8,45	84,2

**Tabla 0-19 Medición en P10 con el micrófono izquierdo**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,809	2,326	2,293	-2,54	0	35,8
<b>250</b>	1,761	2,173	2,139	0,57	1,82	53,3
<b>500</b>	2,122	1,811	1,945	-2,69	0,01	35
<b>1000</b>	2,023	2,109	2,143	-1,11	0,48	43,7
<b>2000</b>	1,79	2,093	2,095	0,79	1,78	54,5
<b>4000</b>	1,333	1,223	1,366	5,38	6,39	77,5
<b>8000</b>	0,413	0,909	0,905	9,09	10,35	89

**Tabla 0-20 Medición en P10 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,852	2,388	2,326	-2,45	-0,35	36,2
<b>250</b>	1,925	2,049	2,033	-3	-1,61	33,4
<b>500</b>	1,942	1,87	1,941	-2,23	-0,92	37,4
<b>1000</b>	1,902	2,088	2,167	-2,66	-0,77	35,2
<b>2000</b>	1,621	1,998	2,052	3,46	4,09	68,9
<b>4000</b>	1,194	1,239	1,391	4,34	5,35	73,1
<b>8000</b>	0,928	0,877	0,955	6,76	8,03	82,6

**Tabla 0-21 Medición en P11 con el micrófono izquierdo**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,021	2,215	2,366	-5,15	-1,94	23,4
<b>250</b>	1,808	2,148	2,039	-2,05	0,92	38,4
<b>500</b>	1,889	2,016	2,063	-1,92	0,35	39,1
<b>1000</b>	1,842	2,128	2,24	-2,3	0,1	37,1
<b>2000</b>	1,49	2,022	2,099	1,99	2,74	61,2
<b>4000</b>	0,964	1,256	1,418	3,44	4,73	68,8
<b>8000</b>	0,599	0,872	0,901	6,14	8,17	80,4

**Tabla 0-22 Medición en P11 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
------------------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	----------------

<b>125</b>	2,01	2,175	2,289	-2,12	-0,07	38
<b>250</b>	1,943	1,939	2,06	-2,7	-0,76	35
<b>500</b>	1,856	1,866	1,855	-2,01	-0,5	38,6
<b>1000</b>	1,681	1,895	1,965	0,68	1,87	53,9
<b>2000</b>	1,696	1,968	2,01	-1	-0,19	44,3
<b>4000</b>	1,081	1,219	1,381	4,41	5,69	73,4
<b>8000</b>	0,914	0,855	0,945	5,11	6,86	76,4

**Tabla 0-23 Medición en P12 con el micrófono izquierdo**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,368	2,088	2,124	-2,47	-1,4	36,1
<b>250</b>	2,11	1,951	2,008	-2,93	-1,38	33,7
<b>500</b>	1,878	1,888	1,862	-1,6	0,14	40,9
<b>1000</b>	1,697	1,953	1,974	0,02	1,5	50,1
<b>2000</b>	1,777	2,08	2,121	1,71	2,63	59,7
<b>4000</b>	1,224	1,254	1,422	6,44	7,48	81,5
<b>8000</b>	1,146	0,827	0,891	5,26	6,71	77

**Tabla 0-24 Medición en P12 con el micrófono derecho**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,983	2,054	2,048	-4,86	-1,82	24,6
<b>250</b>	1,636	1,936	2,011	-0,99	0,98	44,3
<b>500</b>	1,615	1,942	1,968	3,13	4,87	67,3
<b>1000</b>	1,597	2,079	2,203	3,1	5,48	67,1
<b>2000</b>	1,477	2,157	2,187	4,07	5,75	71,8
<b>4000</b>	1,191	1,428	1,601	4,93	7,33	75,7
<b>8000</b>	1,565	0,803	0,943	9,17	11,9	89,2

**Tabla 0-25 Medición en P1 con el micrófono omnidireccional**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,146	2,306	2,236	-4,89	-1,87	24,5
<b>250</b>	2,087	1,968	2,023	-4,29	-1,52	27,1
<b>500</b>	2,066	1,996	2,015	1,19	2,7	56,8
<b>1000</b>	1,714	2,185	2,202	0,75	2,19	54,3
<b>2000</b>	1,685	2,096	2,2	1,74	3,26	59,9
<b>4000</b>	1,104	1,562	1,645	5,01	7,14	76
<b>8000</b>	0,786	0,901	1,011	8,45	11,29	87,5

**Tabla 0-26 Medición en P4 con el micrófono omnidireccional**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,214	2,029	2,213	-1,46	-0,79	41,7
<b>250</b>	2,276	2,071	2,02	-5,52	-4,14	21,9
<b>500</b>	1,98	1,896	1,888	-2,21	0,34	37,6
<b>1000</b>	1,887	2,14	2,194	0,55	1,97	53,2
<b>2000</b>	1,781	2,153	2,198	0,66	2,17	53,8



<b>4000</b>	1,15	1,609	1,674	2,79	4,59	65,5
<b>8000</b>	0,66	0,947	1,061	6,08	8,33	80,2

**Tabla 0-27 Medición en P5 con el micrófono omnidireccional**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	2,026	2,388	2,298	0,04	1,82	50,3
<b>250</b>	1,964	2,084	2,097	-4,07	-1,18	28,2
<b>500</b>	1,799	1,811	1,925	-5,48	-2,46	22,1
<b>1000</b>	1,732	2,098	2,189	-0,98	1,38	44,4
<b>2000</b>	1,937	2,155	2,203	0,88	2,64	55
<b>4000</b>	1,249	1,509	1,626	2,1	4,74	61,8
<b>8000</b>	0,861	0,908	1,013	5,4	8,91	77,6

**Tabla 0-28 Medición en P6 con el micrófono omnidireccional**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,962	1,982	2,104	-3,87	1,37	29,1
<b>250</b>	2,053	1,774	1,988	-6,17	-1,38	19,4
<b>500</b>	1,9	1,9	1,896	-0,45	0,86	47,4
<b>1000</b>	1,859	2,12	2,148	-0,39	2,12	47,7
<b>2000</b>	1,81	2,134	2,173	0,07	1,86	50,4
<b>4000</b>	1,108	1,581	1,661	3,28	6,2	68,1
<b>8000</b>	0,59	0,915	1,058	6,2	10,13	80,7

**Tabla 0-29 Medición en P7 con el micrófono omnidireccional**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>EDT (s)</b>	<b>T20 (s)</b>	<b>T30 (s)</b>	<b>C50 (dB)</b>	<b>C80 (dB)</b>	<b>D50 (%)</b>
<b>125</b>	1,801	2,225	2,276	-1,44	-0,14	41,8
<b>250</b>	2,318	1,981	2,079	-4,53	-2,87	26
<b>500</b>	2,037	1,895	1,905	-0,58	0,6	46,7
<b>1000</b>	2,018	2,112	2,105	0,38	1,59	52,2
<b>2000</b>	1,928	2,163	2,188	0,22	1,23	51,3
<b>4000</b>	1,284	1,568	1,668	3,43	4,38	68,8
<b>8000</b>	0,861	0,987	1,109	5,93	7,31	79,7

**Tabla 0-30 Medición en P10 con el micrófono omnidireccional**